

Teemu Tossavainen

Oikosulkumoottorikäytön suora vääntömomentinsäätö

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

16.3.2015

| | |
|---|---|
| Tekijä Otsikko | Teemu Tossavainen Oikosulkumoottorikäytön suora vääntömomentin säätö |
| Sivumäärä Aika | 42 sivua 16.3.2015 |
| Tutkinto | Insinööri (AMK) |
| Koulutusohjelma | Automaatiotekniikka |
| Suuntautumisvaihtoehto | Energiatekniikka |
| Ohjaaja | Lehtori Kai Virta |
| <p>Tässä insinööriyössä tutkitaan oikosulkumoottorikäytön suoraa vääntömomentin säätöä.</p> <p>Työssä tutkitaan oikosulkumoottoria, vääntömomentin syntymistä oikosulkumoottorissa, esitetään erilaisia oikosulkumoottorin ohjaustapoja ja työn loppuosassa tutkitaan kattavasti suoran vääntömomenttisäädön toteutusta ja sen heikkouksia. Koska suuri osa kaupallisen suoran vääntömomentin säädön yksityiskohdista on salaista tietoa, jäävät ne luonnollisesti tästä työstä pois.</p> <p>Työssä käsitellään ainoastaan pienjännitteellä toimivaa oikosulkumoottoria ja kaksitasoista kolmivaiheista jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajaa, vaikka suoraa vääntömomentin säätöä käytetään muunkin tyyppisissä moottoreissa ja taajuusmuuttajissa ja suuremmillakin jännitteillä.</p> | |
| Avainsanat | oikosulkumoottori, suora vääntömomentin säätö, sähkökäyttö |

| | |
|---|--|
| Author(s) Title | Teemu Tossavainen Direct Torque Control of an Induction Motor |
| Number of Pages Date | 42 pages 16 March 2015 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Automation Engineering (AMK) |
| Specialisation option | Energy Technology |
| Instructor | Kai Virta, Principal Lecturer |
| <p>This thesis studies the induction motor and the emergence of a torque in an induction motor. The study examines a variety of ways to control an induction motor and the final part of this work is a comprehensive study of direct torque control and its weaknesses. Since a large part of details in the commercial direct torque control is classified information, they, obviously, cannot be presented in this thesis.</p> <p>This study deals only with the low voltage squirrel cage induction motor and a two-level three-phase inverter with indirect voltage link, although direct torque control is used in other types of motors and drives even with higher voltages.</p> | |
| Keywords | induction motor, direct torque control, drive |

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Oikosulkumoottori | 1 |
| 2.1 | Ominaisuudet | 1 |
| 2.2 | Kiertokenttäkäämitys | 4 |
| 2.3 | Roottoripiiri | 7 |
| 2.4 | Moottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä | 9 |
| 2.5 | Oikosulkumoottori taajuusmuuttajakäytössä | 10 |
| 2.5.1 | Vakiovuoalue | 10 |
| 2.5.2 | Kentänheikennysalue | 12 |
| 3 | Vääntömomentti | 12 |
| 3.1 | Lorentzin voima | 12 |
| 3.2 | Maxwellin jännitystensori | 15 |
| 4 | Avaruusvektorit | 16 |
| 4.1 | Teoria | 16 |
| 4.2 | Koordinaatistot | 18 |
| 4.3 | Avaruusvektorteorian mukainen sijaiskytkentä | 18 |
| 5 | Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja | 19 |
| 6 | Oikosulkumoottorin säätötavat | 21 |
| 6.1 | Säädön ja ohjauksen ero | 21 |
| 6.2 | Skalaariohjaus ja -säätö | 22 |
| 6.3 | Vektorisäätö | 23 |
| 6.4 | DTC | 25 |
| 6.4.1 | Yleistä | 25 |
| 6.4.2 | Suora käämivuon säätö | 27 |
| 6.4.3 | Vääntömomentin säätö | 33 |
| 6.4.4 | KytKentätaajuus | 34 |
| 6.4.5 | Virtamallikorjaus | 35 |

| | | |
|-----|--------------------------------------|----|
| 7 | Suoran vääntömomentin säädön virheet | 36 |
| 8 | Viritystekniikoita | 39 |
| 8.1 | Identifiointiajo | 39 |
| 8.2 | Roottoripiirin muokkaus | 40 |
| 8.3 | Lämpötilakompensointi | 41 |
| 9 | Yhteenveto | 41 |
| | Lähteet | 42 |

Lyhenteet

| | |
|------|--|
| ABB | Asea Brown Boweri. Yritys. |
| ASIC | Application Specific Integrated Circuit. Sovelluskohtainen mikropiiri joka on suunniteltu yhden tuotevalmistajan tarpeisiin. |
| DTC | Direct Torque Control. Suora vääntömomentin säätö. |

1 Johdanto

Oikosulkumoottorikäytön ajatellaan perinteisesti säätävän pyörimisnopeutta. Asiahan on juuri niin, mutta pyörimisnopeuden säätö on mahdollista vain tekemällä muutoksia moottorin hetkelliseen vääntömomenttiin. Lisäksi on paljon sovelluksia, missä säädetään suoraan käytön vääntömomenttia ja annetaan pyörimisnopeuden asettua mihin tahansa arvoon pyörimisnopeuksien minimi- ja maksimirajojen välillä. Näille säädöille ominaista on, että niitä ohjaa jokin ulompi säätöjärjestelmä ja käytölle tulee ohjearvo momentin suurentamiseen taikka pienentämiseen. Käytön tuottamasta vääntömomentin itseisarvosta ei sinällensä olla kiinnostuneita.

Näiden lisäksi on olemassa vääntömomenttikriittisiä sovelluksia, joissa ollaan nimenomaan kiinnostuneita käytön kehittämisen vääntömomentin tarkkuudesta. Esimerkiksi öljynporauksessa on sovelluksia, joissa porausputkien toisiinsa liittäminen tapahtuu oikosulkumoottorikäytöllä. Putkien liittäminen toisiinsa halutaan tehdä melko tarkasti määritetyllä momentilla. Sovelluksessa siis ajetaan nopeus nolleen ja halutaan vääntömomentin olevan tarkkaa.

Toisena esimerkkinä joissain sovelluksissa käytetään mekaanisen järjestelmän ja oikosulkumoottorin välissä ylikuormakytkimiä järjestelmän, moottorin, taikka molempien suojaukseen. Jos näissä sovelluksissa järjestelmän vaatiman, taajuusmuuttajassa rajoitetun, maksimimomentin ja ylikuormakytkimen laukeamisen välinen vääntömomenttimarginaali on pieni, tulee vääntömomentin rajoituksen toimia tarkasti. Näissä sovelluksissa pyörimisnopeus on yleensä suuri.

Vääntömomentinsäädön tulisi siis toimia tarkasti koko käytettävällä pyörimisnopeusalueella, joka on hyvin haastavaa oikosulkumoottorin tapauksessa.

2 Oikosulkumoottori

2.1 Ominaisuudet

Täysin suljettu oikosulkumoottori on kestävyytensä ja yksinkertaisen rakenteensa vuoksi teollisuuden yleisin sähkökonetyyppi. Sitä on saatavilla useille eri tehoille niin sanottuna

hylytavarana, ja suurista valmistuseristä ja yksinkertaisesta rakenteesta johtuen sen hinta on edullinen. Koneen staattorissa on normaali kolmivaiheinen kiertokenttäkäämitys. Käämirakenne, tarkemmin napojen määrä staattorissa, määrää magneettikentän kiertonopeuden ja sitä kautta myös roottorin nopeuden. Roottorin käämitys koostuu urissa olevista sauvoista, jotka on päistään yhdistetty oikosulkurenkailla. Tätä kutsutaan roottorin häkkikäämitykseksi. Pienikokoisten moottoreiden koko roottoriossa oikosulkenkaineen voidaan tehdä kerralla valamalla alumiinista, tällä menetelmällä saadaan erittäin kestävä rakenne, ja se on myös yksinkertainen valmistaa.

Oikosulkumoottori kuuluu liukurengasmoottorin ohella epätahtikoneisiin. Pyörivän staattorikentän vuoviivat leikkaavat roottorin sauvoja jolloin niihin indusoituu jännite. Koska roottorisauvat ovat oikosuljettuja, syntyy roottorivirta. Roottorivirran ja staattorikentän välille syntyvän voimavaikutuksen vuoksi roottori pyrkii pyörimään, ja jos syntyvä vääntömomentti on suurempi kun pyörimistä vastustava kuormitusmomentti, alkaa roottori pyöriä. Epätahtikoneen ominaisuus on, että roottori pyörii eri tahdissa staattorikentän kanssa. Tätä nopeuseroa kutsutaan jättämäksi, ja vain sen avulla voidaan indusoida oikosuljettuun häkkikäämitykseen vääntömomenttia tuottava virta. Näistä edellä mainituista ominaisuuksista johtuen oikosulkumoottoria kutsutaan myös epätahtikoneeksi ja induktiokoneeksi.

Oikosulkukoneen huonoihin puoliin voidaan lukea sen pieni ylikuormitettavuus kentänheikennysalueella sekä huono tehokerroin, johtuen magnetoinnin tarvitsemasta loistehosta. [1; 2; 3; 4; 5.]

Epätahtikoneille on ominaista, että niiden pyörimisnopeus riippuu kuormittavasta vääntömomentista. Pyörimisnopeudelle n voidaan kirjoittaa yhtälö

$$n = \frac{f_1}{p} - \Delta_n = n_s - \Delta_n \quad (1)$$

jossa, f_1 = syöttötaajuus
 p = moottorin napapariluku
 Δ_n = absoluuttinen jättämä
 $n_s = f_1 / p$ = tahtinopeus

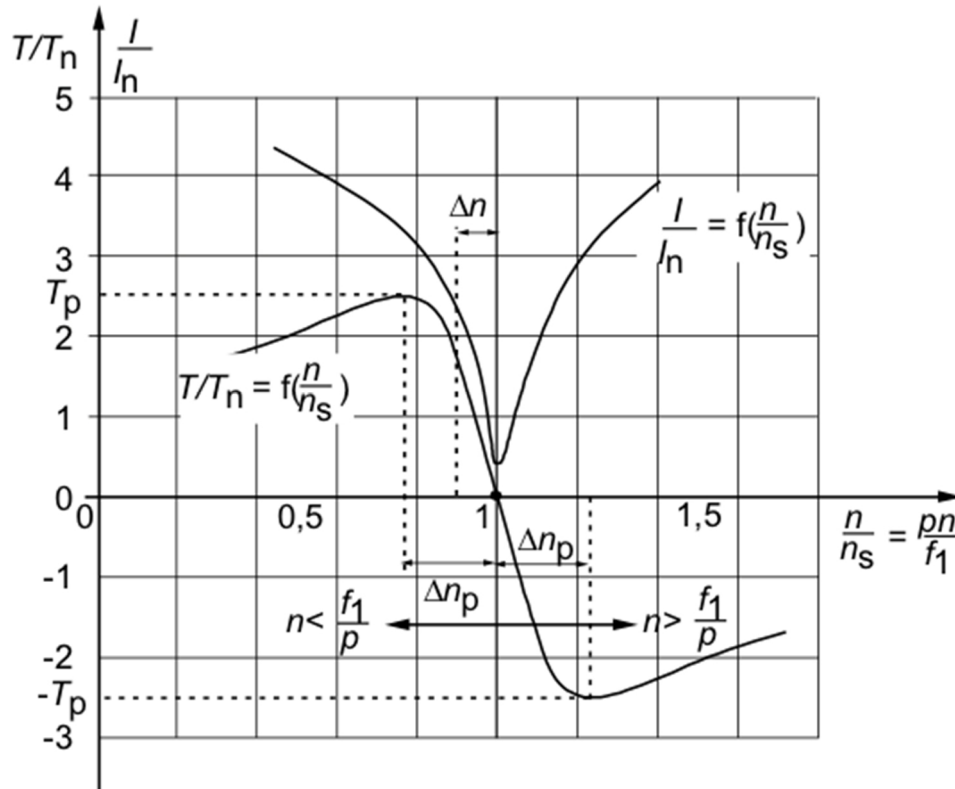
Kun moottoria syötetään vakiojännitteellä ja -taajuudella, eikä lämpötilan vaihteluita oteta huomioon, vääntömomentin suuruus riippuu ainoastaan jättämästä Δ_n .

Positiivisella jättämällä oikosulkukone toimii moottorina ja negatiivisella jättämällä generaattorina. Pyörimissuuntaa vaihdetaan vaihtamalla kahden syöttävän verkkovaiheen keskinäistä järjestystä.

Jos samat oletukset pitävät paikkaansa eikä mekaanisiakaan häviöitä huomioida, myös oikosulkumoottorin ottama vaihevirta riippuu pelkästään jättämästä. Tahtinopeudellansa pyörivä moottori ottaa verkosta vain magnetointivirtaa. Kun jättämä alkaa kasvamaan, alkaa myös vaihevirta nousta voimakkaasti.

Tyypillisesti oikosulkumoottorin huippumomentti on 2 - 3 kertainen nimelliseen momenttiin verrattuna. Positiivinen ja negatiivinen huippumomentti määräytyvät koneen sähköisistä arvoista riippuvilla jättämillä $\pm \Delta n_p$. Tehokas käyttö edellyttää jättämän pitämistä pienenä kapealla alueella $-\Delta n_p \dots + \Delta n_p$. Tyypillinen nimellinen jättämä on 1 - 4 % moottorin nimellisestä nopeudesta ja riippuu lähinnä koneen koosta. [3.]

Kuvassa 1 esitetään jättämän vaikutusta koneen kehittämään vääntömomenttiin ja verkosta ottamaan virtaan koneen toimiessa moottorina ja generaattorina.



Kuva 1. Tyypilliset oikosulkumoottorin vääntömomentit T ja virta I jättämän funktiona.

Kuvassa 1 T = hetkellinen momentti, T_n = moottorin nimellinen momentti, T_p = huippumomentti, f_1 = syöttötaajuus, n = pyörimisnopeus, Δn_p = huippumomenttia vastaava jättämä, Δn = jättämä, n_s = tahtinopeus, p = napapariluku, I = hetkellinen virta, I_n = moottorin nimellinen virta. Huomataan virran ja momentin kasvavan voimakkaasti, kun poiketaan tahtinopeudesta ja jättämä kasvaa.

Taulukossa 1 esitetään tyypillisiä moottorin arvoja, joista erityisen mielenkiintoisia myöhemmin tässä työssä käsiteltäviä aiheita silmällä pitäen, ovat staattorin jännitehäviö ja vääntömomentin muutoksen aikavakio.

Taulukko 1. Tyypillisiä 4-napaisten 400 V oikosulkumoottoreiden arvoja.

| | | | | |
|--|------|------|------|------|
| Nimellisteho kW | 5,5 | 37 | 90 | 200 |
| Nimellinopeus r/min | 1450 | 1480 | 1483 | 1486 |
| Nimellisjättämä % | 3,3 | 1,3 | 1,1 | 0,9 |
| Jännitehäviö staattoriresistanssissa V | 13,0 | 4,6 | 3,3 | 2,2 |
| Vääntömomentin muutoksen aikavakio ms | 14 | 41 | 59 | 89 |

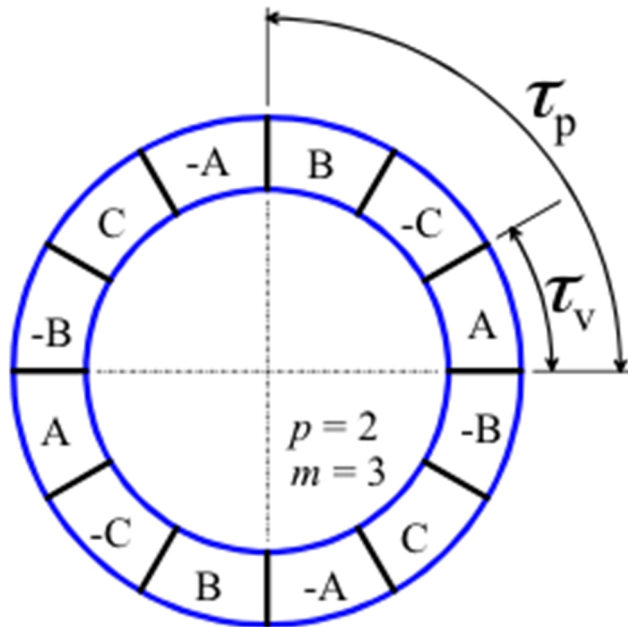
2.2 Kiertokenttäääminen

Periaatteessa koneen staattoriin käämittyjä vaiheita voisi olla mielivaltaisen määrä, mutta kolmivaiheisen sähköverkon käyttö on johtanut siihen, että normaalitapauksessa vaiheita on kolme.

Koneen ilmapälissä etenevän sähkömagneettisen aallon eli vuon aikaansaamiseksi ovat kolmivaiheisen oikosulkumoottorin käämitykset 120 asteen paikallisessa magneettisessa vaihesiirrossa toisiinsa nähden, ja niitä syötetään kolmella vaihevirralla, joilla on vastaava ajallinen vaihesiirto. Näin saadaan koneen käämityksissä ajallisesti ja paikallisesti vaihteleva vuo, joka etenee aaltona staattorin pinnalla ja näin syntyy pyörivä kenttä. [4.]

Kuvassa 2 esitetään oikosulkukoneen staattorin kehän jakaminen vyöhykkeiksi. Ilmapälikehä jaetaan symmetrisesti tasan kaikille navoille siten, että saadaan napajako, joka

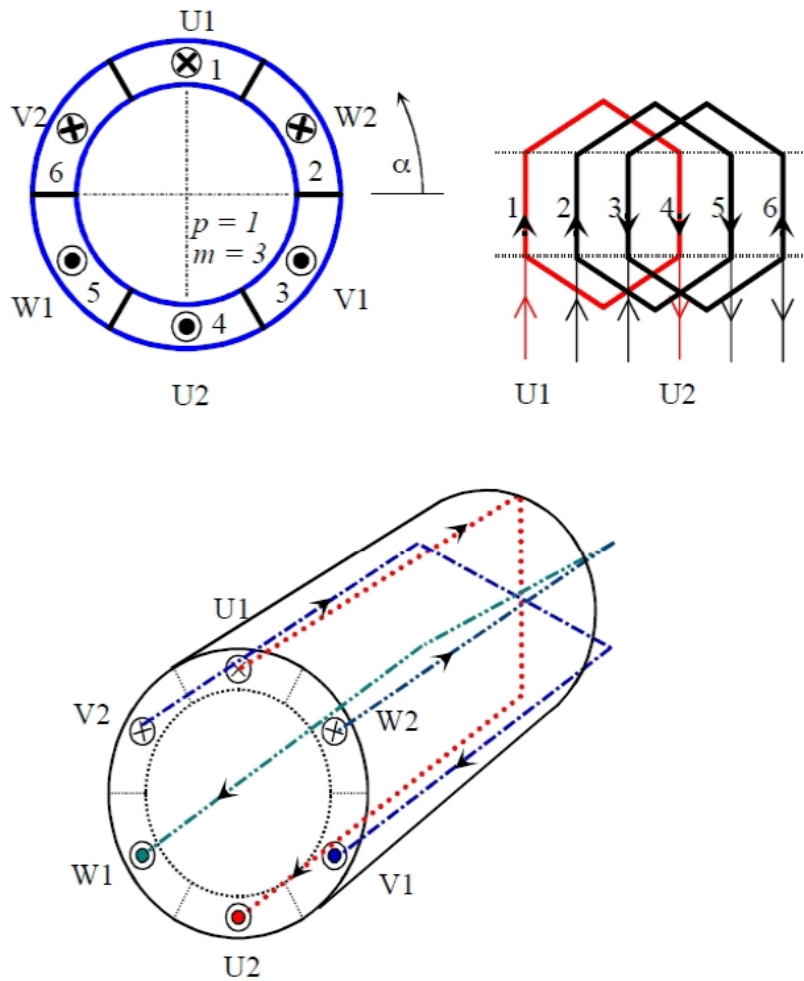
sähköisenä kulmana mitattuna vastaa 180° . Kuvassa on kone, jonka napapariiluku $p = 2$ ja vaiheluku $m = 3$. Napajako on merkitty T_p ja vyöhykejako T_v .



Kuva 2. Kolmivaiheisen nelinapaisen koneen kehä jaettuna vyöhykkeiksi.

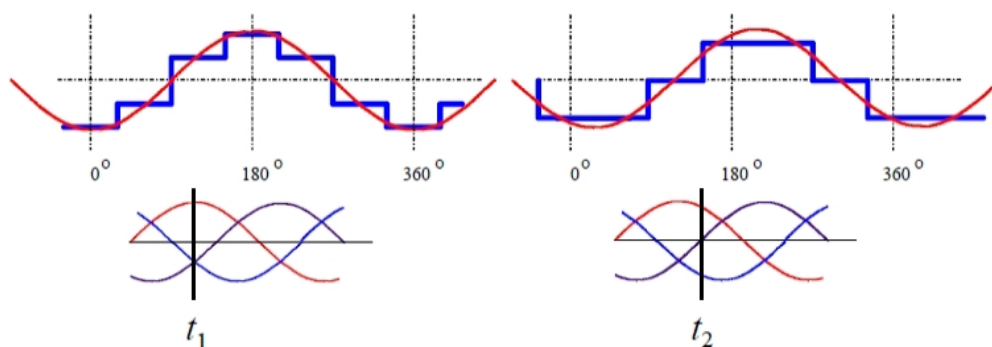
Sähkökoneen käämitys asennetaan staattoriin ja jaetaan staattoriuriin niin, että virtojen synnyttämä magnetomotorinen voima olisi mahdollisimman tarkasti sinimuotoisesti ja-kautunut. [4.]

Kuvassa 3 on esitetty mahdollisimman yksinkertainen staattorikäämi, joka koostuu kolmesta vyyhdistä, joiden sivut on jaettu kuuteen uraan. Musta piste urassa kertoo, että virta kulkee katsojaa kohti. Risti siitä, että virta kulkee katsojasta poispäin.



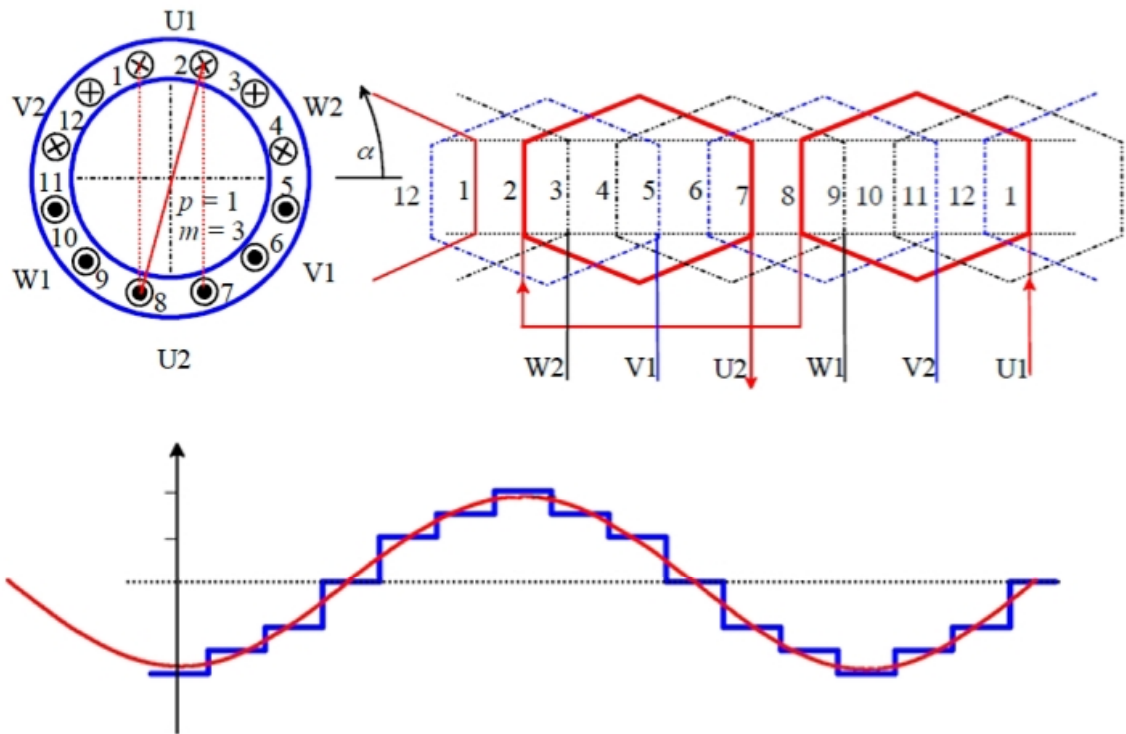
Kuva 3. Yksinkertainen kolmivaihekäämitys.

Näin yksinkertaisen käämityksen magnetomotorinen voima ei kuitenkaan ole kovinkaan sinimuotoinen, vaan se on hyvin askelmainen. (Kuva 4.)



Kuva 4. Yksinkertaisen käämityksen magnetomotorinen voima kahdella eri ajan hetkellä.

Kun tarkastellaan kolmivaihekäämitystä, jossa napaa ja vaihetta kohti onkin kaksi vyyhdin sivua, on magnetomotorinen voima jakaantunut jo huomattavasti sinimuotoisemmaksi. (Kuva 5.)



Kuva 5. Magnetomotorinen voima kun napaa ja vaihetta kohti on kaksi vyyhdin sivua.

Vyyhtien määrää, vaihetta ja napaa kohti staattorissa kuvaa vakoluku q . Mitä suurempi q on, sitä sinimuotoisemmin magnetomotorinen voima jakaantuu staattorin pinnalle. [4.]

Yleisesti kiertokenttäkäämityksestä voidaan ajatella, että kun napapariluku kasvaa yhdellä, koneen nimellinen vääntömomentti kaksinkertaistuu ja nimellinen pyörimisnopeus puolittuu.

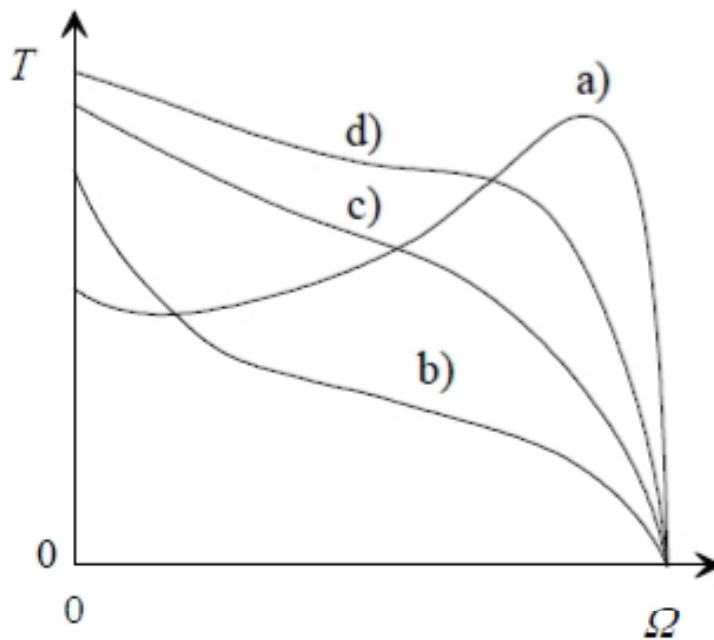
2.3 Roottoripiiri

Roottorilla on merkittävä vaikutus koneen kehittämään maksimimomenttiin, sekä koneen hyötysuhteeseen. Lisäksi roottorin resistanssin muutokset vaikuttavat koneen momenttikäyrään. Roottoripiirin oikosuljetun häkkikäämityksen geometriaa muokkaamalla voidaan koneen ominaisuuksia muokata.

Massiiviroottori soveltuu lähinnä suurella nopeudella pyöriviin koneisiin, ja sille on tyypillistä suuri resistanssi ja hajareaktanssi. Massiiviroottorin ominaisuuksia voidaan parantaa urittamalla sen pintaa. Aksiaalisella urituksella saadaan ohjattua pyörrevirtoja momentin kehittämisen kannalta edullisempaan suuntaan, ja radiaalisella urituksella voidaan parantaa koneen hyötysuhdetta vaikuttamalla pyörrevirtojen kulkureitteihin.

Tavallinen häkkiroottori tuottaa suurimman momentin pienillä jättämäarvoilla, kun taas massiiviroottori antaa suuren käynnistysmomentin. [1; 2; 4.]

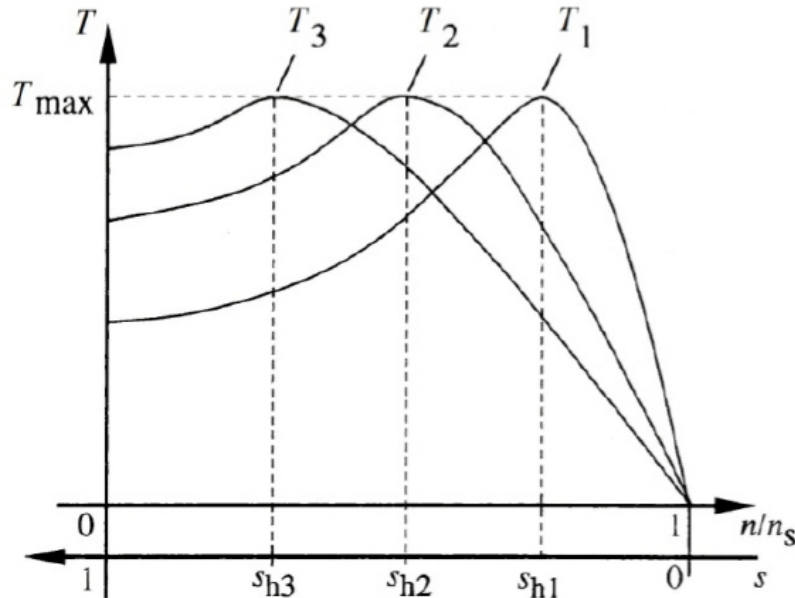
Kuvassa 6 on esitetty erilaisten roottoreiden tuottamia vääntömomenttikäyriä T mekaanisen kulmanopeuden Ω funktiona; a = normaali kaksoishäkkikämmiroottori, b = sileä massiiviroottori ilman oikosulkurenkaita, c = massiiviroottori kuparisilla oikosulkurenkailla, d = aksiaalisesti ja tangentialisesti uritettu massiiviroottori kuparisilla oikosulkurenkailla.



Kuva 6. Erityyppisten roottoreiden kehittämiä momenttikäyriä.

Vääntömomenttikäyrän muotoon vaikuttaa oleellisesti myös roottoriresistanssi. Resistanssin kasvaessa kasvaa myöskin käynnistysmomentti ja koneen jättämä. Kylmän koneen jättämä on noin 60 % vastaavan nimellisessä lämpötilassa olevan koneen jättämästä ja nimellisessä lämpötilassa olevan moottorin roottoriresistanssi on noin 1,5-kertainen kylmään moottoriin verrattuna.

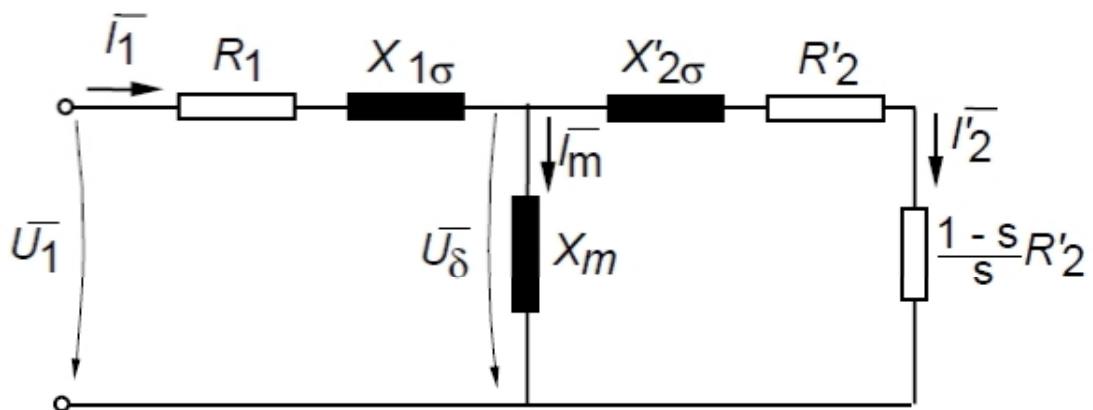
Lämmennyt moottori myös saavuttaa huippumomenttinsa pienemmällä pyörimisnopeudella, mutta huippumomentin suuruuteen resistanssi ei vaikuta. Kuvassa 7 havainnollistetaan roottoriin resistanssin vaikutusta momenttikäyrän muotoon. [3; 5.]



Kuva 7. Roottoriin resistanssin vaikutus momenttikäyrän muotoon.

2.4 Moottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä

Alla olevaa oikosulkumoottorin yksivaiheista sijaiskytkentää voidaan käyttää vääntömomentin T , huippumomentin T_h ja huippujättämän Δ_{nh} laskemiseen, sillä edellytyksellä, ettei vaihevirran I_1 suuruus vaikuta ilmavälijännitteeseen U_δ .



Kuva 8. Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä.

jossa,

- R_1 = staattoriresistanssi
- R_2 = staattoriin redusoitu roottoriresistanssi
- $X_{1\sigma}$ = staattorin hajareaktanssi
- $X_{2\sigma}$ = staattoriin redusoitu roottorin hajareaktanssi
- $X_{2\sigma 0}$ = staattoriin redusoitu roottorin vaihereaktanssi suhteellisen jättämän arvolla 1
- X_m = magnetointireaktanssi eli pääreaktanssi
- I_1 = vaihevirta
- I_m = magnetointivirta
- p = napapariluku
- s = suhteellinen jättämä
- I_2 = staattoriin redusoitu roottorivirta
- U_1 = vaihejännite
- U_δ = ilmavälijännite
- ω_1 = syöttöjännitteen kulmanopeus
- ω_2 = roottorijännitteen kulmanopeus

Näistä saadaan vääntömomentille yhtälö

$$T = 3pU_\delta^2 \cdot \frac{R_2}{\omega_1 \left[\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_{2\sigma 0}^2 \right]} \cdot \frac{1}{s} = U_1^2 p \cdot \frac{R_2}{\omega_1 \left[\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_{2\sigma 0}^2 \right]} \cdot \frac{1}{s} \quad (2)$$

Huippuvääntömomentille yhtälö

$$T_h = \frac{pU_1^2}{2\omega_1 X_{2\sigma 0}} \quad (3)$$

Ja huippuvääntömomenttia vastaavalle jättämälle yhtälö

$$S_h = \frac{R_2}{X_{2\sigma 0}} \quad (4)$$

Yhtälössä 4 roottorin resistanssi ja reaktanssi ovat redusoimattomia arvoja.

2.5 Oikosulkumoottori taajuusmuuttajakäytössä

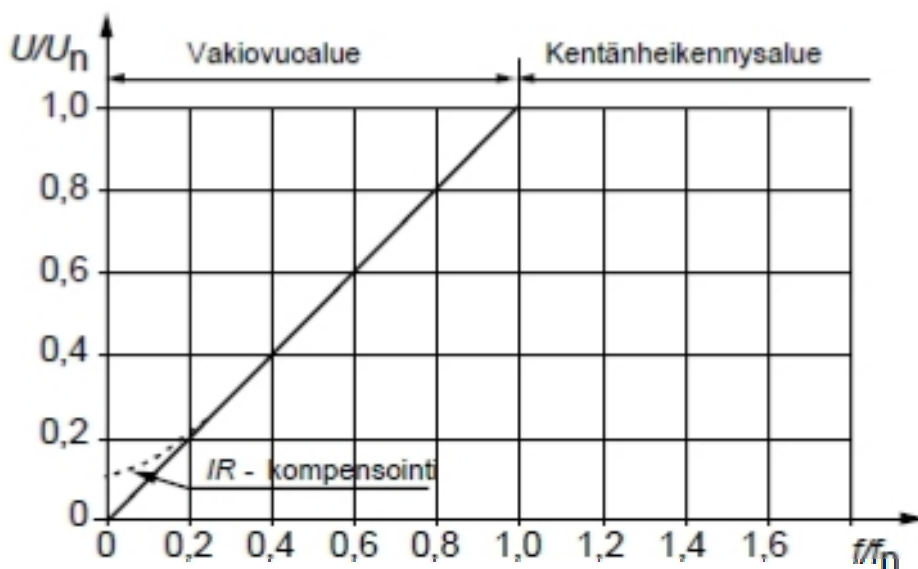
2.5.1 Vakiovuoalue

Kun halutaan moottorin ominaisuuksien pysyvän samanlaisina taajuuden muuttuessa, tulee moottorin momenttikäyrän säilyä muodoltaan muuttumattomana. Momenttikäyrän määrittelevät huippumomentti ja sitä vastaava suhteellinen jättämä. Nämä pysyvät vakiosuuruisina, jos moottorin ilmavälivuo pidetään samana eri taajuuksilla ja kuormituksilla.

Sijaiskytkennässä (Kuva 8.) tämä merkitsee magnetointivirran pitämistä vakiosuuruisena. Vakiovuoalueella, joka jatkuu nollanopeudesta nimelliseen nopeuteen, ilmavälivuo

pyritään pitämään vakiona. Suurella osalla alueesta tähän päästään pitämällä syöttöjännitteen ja taajuuden suhde vakiona kuvan 9 mukaisesti. Tavallisesti moottorin nimellisellä taajuudella liitinjännite säädetään nimelliseksi ja suhde on siten määrätty. Tällä suhteella moottori antaa pienimmillä tehohäviöillä parhaan vääntömomentin.

Pienillä syöttötaajuuksilla kuluttaa staattoriresistanssi merkittävän osan syöttöjännitteestä. Tällöin ilmajännite jää haluttua pienemmäksi. Resistanssin vaikutus voidaan kompensoida nostamalla pienillä taajuuksilla syöttöjännitettä lineaarisen U/f -käyrän yläpuolelle. Tarvittavaa kompensointia kutsutaan IR-kompensoinniksi, ja sen tarve on sitä pienempi, mitä suurempi moottori on kyseessä (Taulukko 1.). Toisaalta kompensointi on hyvä tehdä riippuvaiseksi kuormituksesta. Jos vääntömomentin tarvetta ei ole, jännitettä ei kannata nostaa. [2; 3; 4; 5.]



Kuva 9. Moottorin syöttöjännitteen ohjaus taajuuden funktiona.

Vakiovoalla toimittaessa kutakin vääntömomenttia vastaa taajuudesta riippumatta aina sama vaihevirta. Sijaiskytkennässä magnetointivirta ja roottorivirta ovat vakiosuuruisia. Lisäksi roottorivirralla on syöttötaajuudesta riippumatta sama vaihesiirto ilmajännitteeseen nähden. [3.]

2.5.2 Kentänheikennysalue

Nimellisen nopeuden yläpuolella syöttöjännite pidetään nimellisenä, eikä sitä voida enää kasvattaa (Kuva 9.). Tästä johtuu, että ilmavälivuota joudutaan pienentämään kääntäen verrannollisena taajuuteen. Huippumomenttia vastaava jättämä on sen sijaan lähes vakio.

Momenttikäyrän madaltumisesta johtuen määrättyä kuormitusmomenttia vastaava jättämä on kentänheikennysalueella suurempi kuin vakiovualueella. Kentänheikennysalueella magnetointivirta alenee kääntäen verrannollisena taajuuteen. Tästä syystä kuormittamattoman moottorin vaihevirta laskee selvästi taajuuden mukana. Kuormitetussa moottorissa roottoriin tehokertoimen takia roottorivirralla on taipumus kasvaa. Magnetointivirran pienentyminen ja roottorivirran kasvu vaikuttavat toisiaan vastaan. Vakiovirralla moottori kehittää siten kentänheikennysalueella likimain vakiotehon. Tästä syystä kentänheikennysaluetta kutsutaan myös vakiotehoalueeksi.

Kullekin moottorille ominaisella taajuudella (noin 1,5 – 2 kertaa nimellinen taajuus) huippumomentti on laskenut niin alas, että saavutettavaa jättämää joudutaan rajoittamaan. Rajoituksen määrää kippausvaara, eikä virran suuruus. Tällöin moottorista ei voida ottaa enää vakiotehoa ja siirrytään suurnopeusalueelle. [3; 4.]

3 Vääntömomentti

3.1 Lorentzin voima

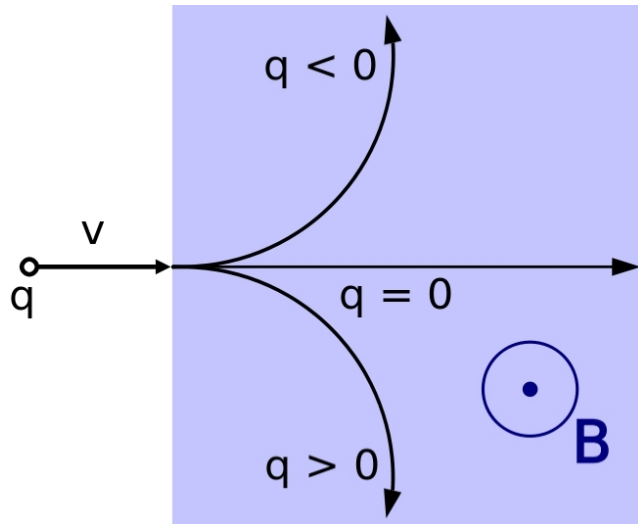
Kun sähköisesti varautunut hiukkanen joutuu sähkömagneettiseen kenttään, alkaa siihen vaikuttamaan sähkökentästä aiheutuva voima qE ja magneettikentästä johtuva voima $qv \times B$. Kun nämä kaksi voimaa yhdistyvät, saadaan niistä Lorentzin voiman yhtälö

$$F = q(E + v \times B) \quad (5)$$

jossa,

- F = voima
- E = sähkökentän voimakkuus
- B = magneettikentän voimakkuus
- q = hiukkasen sähkövaraus
- v = hiukkasen hetkellinen nopeus

Positiivisesti varautunut hiukkanen kiihtyy sähkökentän suuntaan, mutta magneettikenttä aiheuttaa hiukkaseen sekä magneettikenttää että nopeuden suuntaa vastaan kohtisuoran voiman. Kuva 10 esittää varautumattoman, positiivisesti varautuneen, sekä negatiivisesti varautuneen hiukkasen joutumista sinertävällä värillä kuvattuun magneettikenttään B , jonka vaikutus on kuvassa katsojaan päin. [6.]



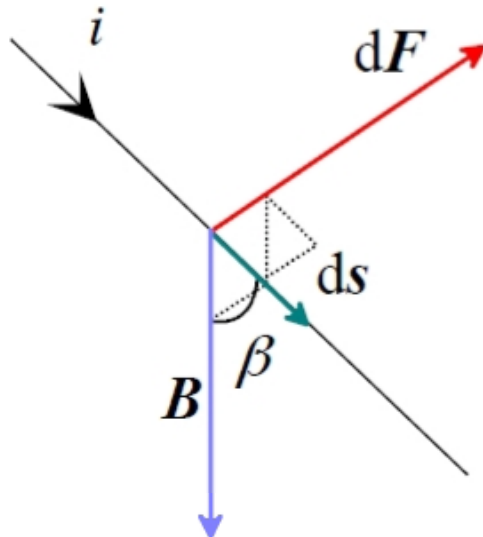
Kuva 10. Magneettikentän vaikutus eri tavoilla varautuneen hiukkasen liikerataan.

Kun roottoriin sauvaan on indusoitunut jännite, niin oikosuljetun häkkikäämityksen vuoksi sauvassa alkaa kulkea virta. Oikosulkumoottorissa vääntömomenttia tuotetaan pääasiassa magneettikentän avulla. Kun Lorentzin voiman yhtälön magneettista osaa sovelletaan virralliseen johtimeen, eli tässä tapauksessa roottoriin, saadaan voimalle yhtälö

$$dF = i ds \times B \quad (6)$$

jossa, dF = johdinalkioon vaikuttava voima
 i = virta
 ds = johdinalkio
 B = vuontiheys

Ristitulosta voidaan päätellä, että voima on suurimmillaan, kun virta ja vuontiheys ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan. Seuraavan sivun kuvassa 11 se merkitsisi sitä, että $\sin\beta$ olisi 1. Tämä toteutuu sähkömoottorissa kohtuullisen hyvin.



Kuva 11. Lorentzin voiman soveltaminen virralliseen johtimeen.

Kun koneen ilmapälistä roottoriin tunkeutuva magneettivuo kohtaa virrallisen roottorin sauvan, syntyy roottorin pinnan tangentin suuntainen Lorentzin voiman määräämä voima, joka kehittää moottorin vääntömomentin. [4; 6.]

Myös staattorissa esiintyy samanlainen, mutta päinvastainen vääntömomentti. Mutta koska staattori on pultattu kiinni moottoripetiin, ei se pääse pyörimään.

Staattorivirrasta ja ilmapälikäämivuosta voidaan kaksinapaisen koneen sähköiselle vääntömomentille johtaa yleinen yhtälö

$$T_e = \frac{3}{2} p \Psi_s \times i_s = \frac{3}{2} p \Psi_m \times i_s \quad (7)$$

jossa,
 T_e = sähköinen vääntömomentti
 p = napapariluku
 i_s = staattorivirta
 Ψ_s = staattorikäämivuo
 Ψ_m = ilmapälikäämivuo

Vääntömomenttia laskettaessa käämivuolla tarkoitetaan moottoriin syötetyn jännitteen muodostamaa käämivuovektoria, virtavektoreina koneeseen syötettyjen virtojen yhdessä muodostamaa avaruusvektoria ja ristitulon tulos kerrotaan koneen napapariluvulla. Jänniteporras tulee olla sama käämivuolle ja virralle, yleensä käytetään staattorikäämitykseen redusoituja arvoja. [4.]

3.2 Maxwellin jännitystensori

Teoria venyvistä vuoviivoista kuvaa myös hyvin vääntömomentin syntymistä oikosulkumoottorissa. Michael Faraday on aikanaan väittänyt, että vuoviivojen voidaan ajatella olevan kuin kumilankoja, jotka pyrkivät lyhenemään, kun niitä venytetään. Maxwellin jännitysteoria perustuu tähän, ja sen mukaan tyhjiössä kappaleiden välillä vaikuttava magneettikenttä aiheuttaa kappaleiden pinnalle jännityksen. Jännitys esiintyy voimaviivojen suuntaisena ja synnyttää painetta niihin nähden suorassa kulmassa. Jännitystermi voidaan jakaa kappaleen suhteen normaalin ja tangentin suuntaiseen komponenttiin. Tangentiaalinen komponentti kehittää roottoriin vääntömomenttia. Syntyvän vääntömomentin pystyisi laskemaan, kun integroisi jännitystensorin roottorin kokoisen lieriön yli ja kertoisi sen roottorin säteellä, mutta tulokset ovat epätarkkoja. [4.]

Kuva 12 pyrkii esittämään jännittyneitä vuoviivoja vastapäivään pyörivässä moottorissa. Vuoviivat ylittävät ilmapälin vinosti, ja staattorin puolen vuoviivat ovat edellä roottorin vuoviivoja. Kun ajatellaan, että viivat ovat venyviä, syntyy roottoria vastapäivään pyörittävä voima.



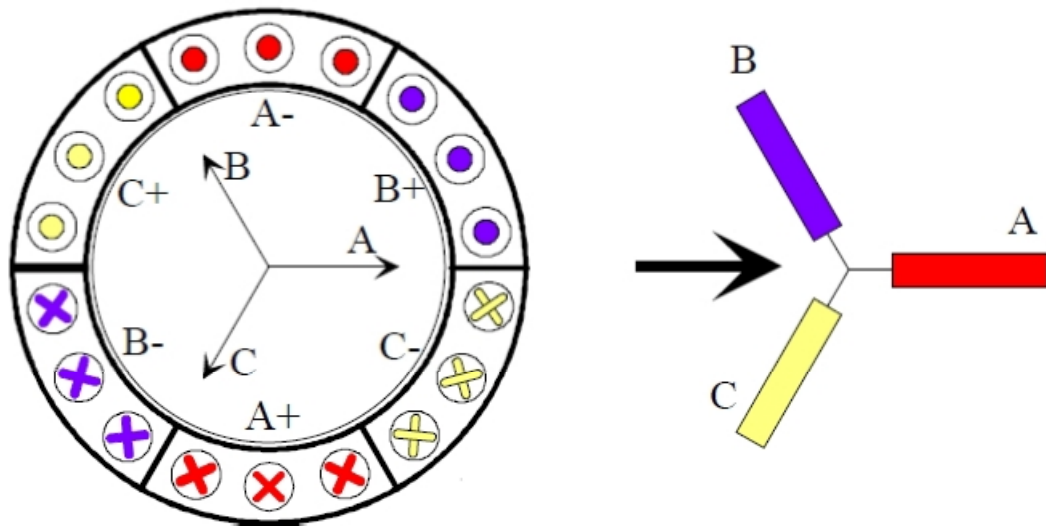
Kuva 12. Kuormitetun oikosulkukoneen ilmapälinvuo.

4 Avaruusvektorit

4.1 Teoria

Avaruusvektori on kompleksinen suure, jonka kulma ja pituus vaihtelevat ajan funktiona. Kun sähkömoottoria kuvataan avaruusvektorin avulla, otetaan huomioon kaikkien vaiheiden yhdessä muodostama hetkellinen jännite-, virta- tai vuovektori. [4; 7.]

Avaruusvektoriteoriassa moottorin staattorin uriin jaetut käämit kuvataan magneettiakseleiden suuntaisesti kuvan 13 mukaisesti.



Kuva 13. Vaihekäämien muunnos magneettiakseleille keskitetyiksi käämeiksi.

Matemaattisesti hetkellinen staattorin virtavektori määritellään alla olevalla kaavalla. Alaindeksi s tarkoittaa staattoria ja alaindeksit A , B ja C magneettiakseleiden suuntia. Jos käytetään vektorin määrittämiseen redusointikerrointa $2/3$, antaa se mahdollisuuden käyttää koneen todellisen sijaiskytkennän mukaisia resistansseja ja induktansseja.

$$i_s(t) = \frac{2}{3} (a^0 i_{sA}(t) + a^1 i_{sB}(t) + a^2 i_{sC}(t)) \quad (8)$$

jossa, $a = \text{vaiheensiirto-operaattori} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

Jännitevektori määritellään samalla tavalla kaavalla

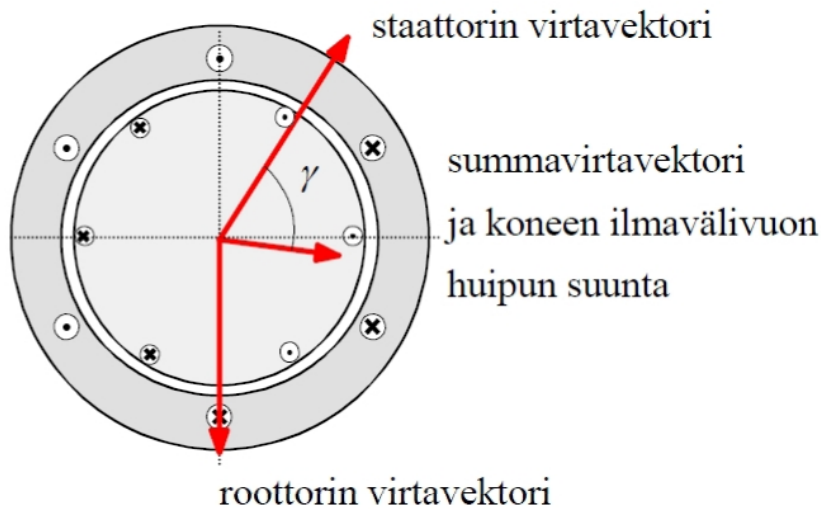
$$u_s(t) = \frac{2}{3}(a^0 u_{sA}(t) + a^1 u_{sB}(t) + a^2 u_{sC}(t)) \quad (9)$$

Ja käämivuovektori kaavalla

$$\psi_s(t) = \frac{2}{3}(a^0 \psi_{sA}(t) + a^1 \psi_{sB}(t) + a^2 \psi_{sC}(t)) \quad (10)$$

Samalla tavalla voidaan muodostaa myös roottorin virta-, jännite- ja käämivuovektorit.

Kuvassa 14 esitetään kaksinapaisen oikosulkumootorin staattori- ja roottorivirrat ja niiden muodostamat virtavektorit eräällä ajan hetkellä. Koska ilmavälivuon huipun suunta on sama kuin summavirtavektorin, on se suuressa kulmassa sekä staattorin että roottorin virtavektoreihin nähden. Tämä tarkoittaa kaavojen 6 ja 7 mukaan sitä, että kone tuottaa tällä ajan hetkellä hyvin vääntömomenttia.



Kuva 14. Kaksinapaisen oikosulkumootorin virrat ja virtavektorit eräällä ajan hetkellä.

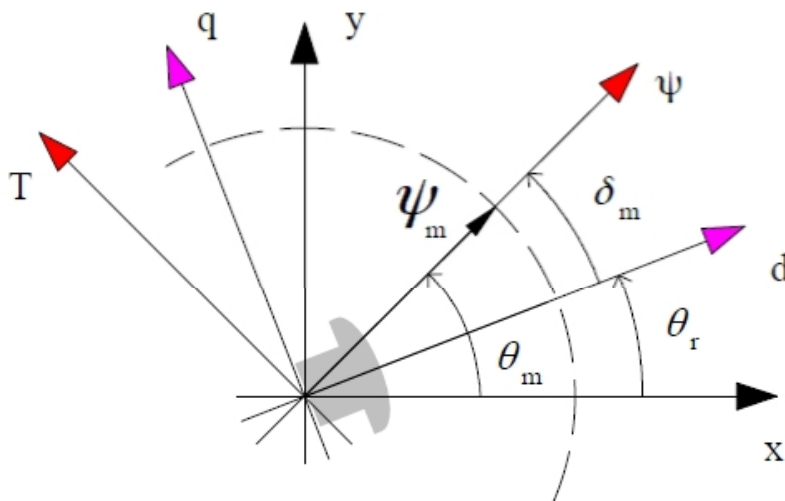
Avaruusvektoreita voi käyttää kaikenlaisten virtojen näyttämiseen, sillä ei ole mitään väliä, vaikka virrat olisivat esimerkiksi säröytyneitä taikka epäsymmetrisiä. Vektoriesitys helpottaa huomattavasti oikosulkukoneen tilan kuvausta, jos sitä vertaa esimerkiksi kaikille virroille erikseen kirjoitettaviin yhtälöihin. [4.]

Matemaattisella muunnoksella voi kolmivaiheisen symmetrisen käämityksen korvata symmetrisellä kaksivaiheisella käämityksellä ja alkaa siten esittää avaruusvektorit kaksiakseliesityksenä. Esimerkiksi vektorisäätöjä toteutettaessa tämä konkretisoituu, kun virta jaetaan magneetoivaan ja vääntömomenttia tuottaviin osiin.

4.2 Koordinaatistot

Avaruusvektoreita esitetään erilaisissa koordinaatistoissa. Taajuusmuuttajien säädön kannalta voi olla järkevämpää siirtyä staattorikoordinaatistosta johonkin toiseen koordinaatistoon. Esimerkiksi oikosulkumoottorin vektorisäätö on yleisimmin toteutettu roottorikäänmivuo-orientoidussa koordinaatistossa ja tahtikoneen roottorikoordinaatistossa. [4.]

Kuvassa 15 on esitetty ilmapääläkäämivuohon kiinnitetty ψT -koordinaatisto, roottoriin kiinnitetty dq -koordinaatisto ja staattoriin kiinnitetty xy -koordinaatisto. Kulma θ_m on ilmapääläkäämivuon asentokulma staattorikoordinaatistossa, kulma θ_r on roottorin asentokulma staattoriin nähden ja kulma δ_m on roottori- ja ilmapääläkäämivuon välinen kiertymäkulma, eli ilmapääläkäämivuon napakulma. Tästä esimerkkikuvasta nähdään, että komponentit ovat 90° kulmassa toisiinsa nähden, joten kyseessä on tahtikone eikä oikosulkumoottori.



Kuva 15. Esimerkkejä koordinaatistoista.

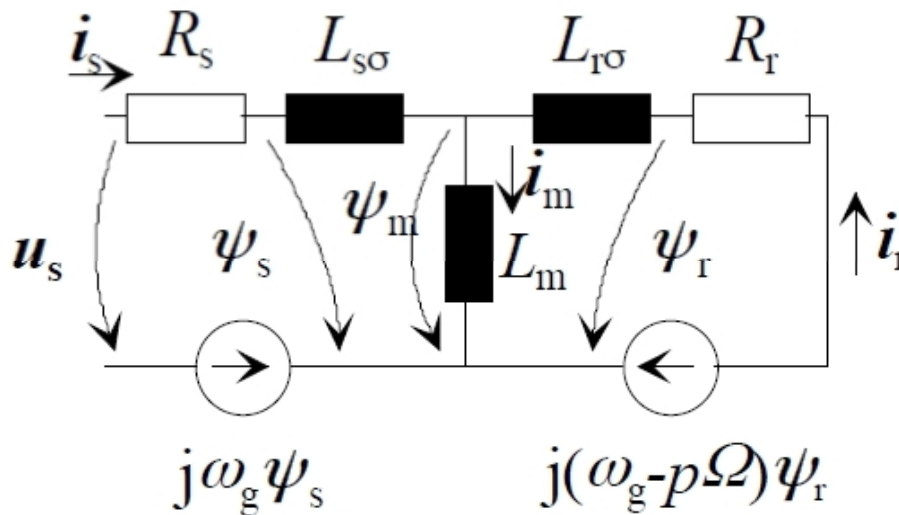
Staattorikoordinaatistosta roottorikoordinaatistoon siirtymisen voi ajatella siten, että hypäisi karusellin kyytiin. Jos haluaa nähdä mitä karusellissa tapahtuu, on siellä oltava kyydissä.

4.3 Avaruusvektoriteorian mukainen sijaiskytkentä

Kun tehollisarvosijaiskytkentä korvataan kuvassa 16 esitetyllä avaruusvektoriteorian mukaisella sijaiskytkennällä, pätee se yleisesti oikosulkumoottorille myös muutostiloissa.

Sijaiskytkennässä ei oteta huomioon koneen magneettista kyllästystä, rautahäviöitä taikka harmonisia, mutta on silti yleensä riittävän tarkka säädön toteuttamiselle. [4.]

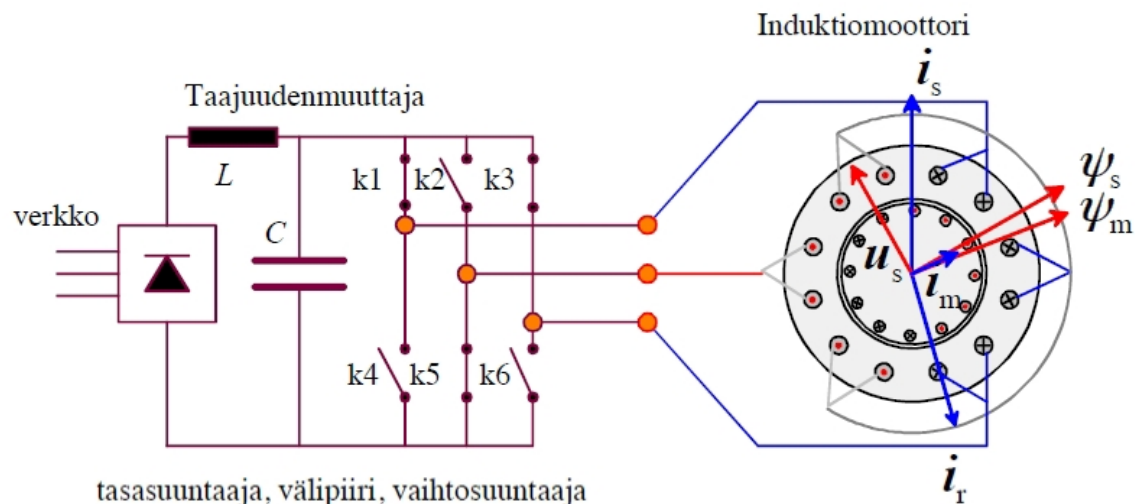
Kuvassa 16 jännitteet, virrat ja käämivuot ovat vektoreita. Kuvassa koordinaatisto pyörii yleisellä kulmanopeudella ω_g , mutta jos käytetään staattorikoordinaatistoa, kulmataajuus katoaa.



Kuva 16. Avaruusvektoriteorian mukainen oikosulkukoneen sijaiskytkentä.

5 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja

Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, tasajännitevälipiiristä ja vaihtosuuntaajasta seuraavan sivun kuvan 17 mukaisesti. Tasasuuntaussilta on yleensä kolmivaiheinen kuusipulssidiodisilta, tai kolmesta tyristorista ja kolmesta diodista koostuva puoliohjattava silta. Diodien tilalla voidaan käyttää myös esimerkiksi tehotransistoreja tai tyristoreja, jolloin silta on täysin ohjattava ja tehoa voidaan siirtää verkkoon päin, eli moottorin käyttäminen generaattorina on mahdollista. Tämä on tyypillistä esimerkiksi tuulimyllyissä.

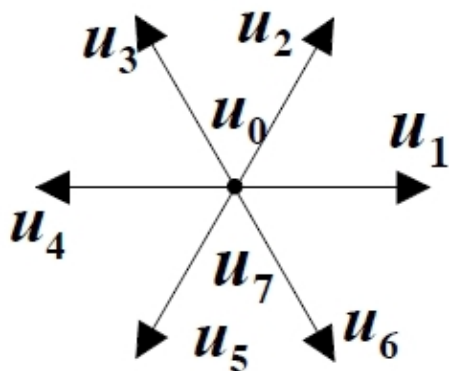


Kuva 17. Tyypillinen 2-tasoinen jännitevälipiirillinen sähkökäyttö.

Kolmivaiheinen verkkojännite muutetaan tasasuuntaajassa tasajännitteeksi. Välipiiriin kuuluu tasasuuntaajan virtaa suodattava kuristin ja tasasuunnatun verkkojännitteen vaihtokomponentteja suodattava kondensaattori. Tavallisesti kuristin on kupari- tai alumiinikäämityksellä varustettu kaksipylväskuristin. Kuvassa 17 kuristin on välipiirissä, mutta se voi olla myös kolmeen vaiheeseen kytkettynä verkon puolella.

Välipiirissä on yleensä useita elektrolyyttikondensaattoreita, joiden tehtävä on tasajännitteen suodattaminen tasaiseksi. Välipiiriin voi kuulua myös jarruvastushaara, jossa moottorin jarrutusenergia muutetaan lämmöksi vastuksessa. Jännitevälipiiriin voidaan ajatella vastaavan LC-alipäästösuodatinta. Vaihtosuuntaaja eli invertteri kytkee tehotransistoreita joko positiiviseen taikka negatiiviseen välipiirin kiskoon. Kytkennöillä luodaan vaihtojännite halutulla taajuudella moottorille. [7.]

Kolmivaiheisella kaksitasoinvertterillä on 2^3 , eli kahdeksan kytkinasentokombinaatiota. Niillä voidaan luoda yhteensä seitsemän eri jännitevektoria. Kombinaatioista kuusi, $u_1 - u_6$, ovat itseisarvoiltaan yhtä suuria, mutta erisuuntaisia jännitevektoreita ja kaksi niistä, u_0 ja u_7 , ovat nollavektoreita (Kuva 18.).



Kuva 18. Kaksitasoinvertterin jännitevektorit.

Invertterin kytkentänopeudesta saa käsityksen, jos ajatellaan vaikka 1000 kierrosta minuutissa pyörivää käyttöä, jonka sen hetkinen kytkentätaajuus on 4 kHz. Tämä tarkoittaa, että kytkentäkombinaatiota muutetaan noin 240 kertaa yhden kierroksen aikana, eli 60:ssa millisekunnissa.

6 Oikosulkumoottorin säätötavat

6.1 Säädön ja ohjauksen ero

Ohjaus perustuu ohjearvoihin ja laitteesta muodostettuun malliin, jonka perusteella laitetta ohjataan. Takaisinkytkeviä osia ei ole, joten ohjauksen tarkkuus perustuu muodostetun mallin tarkkuuteen.

Säätö perustuu takaisinkytkentätietoon, jolloin laitteesta ei välttämättä tarvitse olla edes kovin tarkkaa mallia. Säätöalgoritmi vertaa takaisinkytkentätietoa ohjearvoon ja ohjaa laitetta säätöpoikkeamaa, eli ohje- ja oloarvon erotusta, pienentävästi.

Sähkömoottorin pystyy matemaattisesti mallintamaan kohtuullisen hyvin. Käämivuon ja vääntömomentin mittaaminen sen sijaan olisi käytännön sovelluksissa erittäin kallista. Tämän vuoksi käämivuota ja vääntömomenttia sähkömoottorikäytöissä poikkeuksetta ohjataan, vaikkakin puhuttaisiin esimerkiksi suorasta vääntömomentinsäädöstä. [1.]

Jos sen sijaan käyttö on nopeussäädetty ja takaisinkytkentätietona on esimerkiksi pulsianturi, voidaan puhua säädöstä.

6.2 Skalaariohjaus ja -säätö

Skalaarisuureella kuvataan matemaattista tai fysikaalista ilmiötä, jolla on suuruus, mutta ei suuntaa.

Skalaariohjauksen tapauksessa nämä suureet ovat taajuus ja jännite. Moottoria ohjataan kasvattamalla jännitettä lineaarisesti nollanopeudesta nimelliseen jännitteeseen saakka taajuuden funktiona, pois lukien pienillä taajuuksilla mahdollisesti käytettävästä IR-kompensoinnista johtuva suhteellisesti suurempi jännite (Kuva 9.). Kentänheikennysalueella jännite pidetään vakiona eli nimellisjännitteen suuruisena, kuten muissakin ohjaustavoissa.

Ohjaus mittaa vaihevirrat ja laskee niistä pätövirtakomponentit. Näitä käytetään lähinnä vääntömomentin estimointiin ja suojaustarkoituksiin. Skalaariohjauksessa oletetaan, että pätövirran ja jännitteen tulo on suoraan verrannollinen vääntömomenttiin. Nopeuden takaisinkytkentää ei skalaariohjauksessa ole, eikä se sovellu dynamiikaltaan vaativiin sovelluksiin. Käytön nopeustarkkuuden määrää jättämän suuruus. [1; 9.]

Skalaariohjaus perustuu pysyvyystilan jänniteyhtälöön

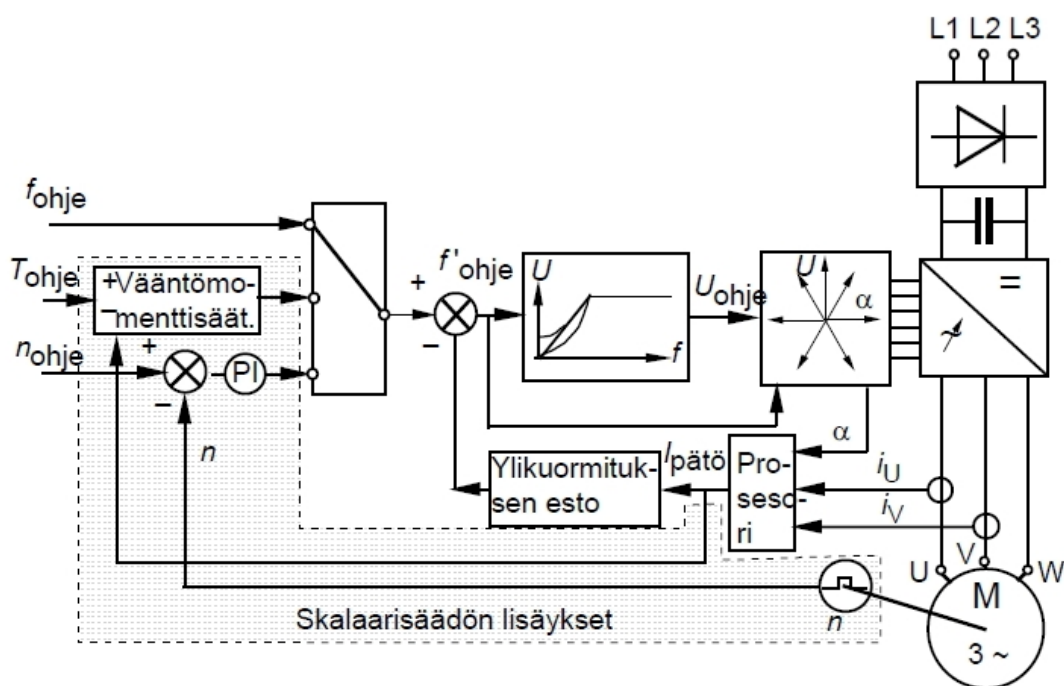
$$u_{s,ref} = R_s I_s + \omega_{ref} \Psi_{s,ref} \quad (11)$$

jossa,

- $u_{s,ref}$ = staattorijännitteen ohjearvo
- R_s = staattoriresistanssi
- I_s = staattorivirta
- ω_{ref} = kulmataajuuden ohjearvo
- Ψ_s = staattorikäämivuon ohjearvo

Skalaariohjausta voidaan käyttää monissa erikoissovelluksissa. Esimerkiksi jos käytöllä ohjataan useampia, erikokoisia moottoreita, taikka jos sitä ajetaan kokonaan ilman moottoria, esimerkiksi testitarkoituksissa. [10.]

Skalaarisäätö on säätö, joka koostuu nopeudensäädön ja vääntömomentinsäädön kaskadiytkennästä kuvan 19 mukaisesti. Se perustuu moottorin staattisen tilan tuntemiseen moottorin pysyvän tilan yhtälöiden mukaisesti. Skalaariohjauksesta saa skalaarisäädön lisäämällä siihen nopeuden ja virran takaisinkytkentätiedon.



Kuva 19. Skalaariohjauksen ja –säädön lohkokkaavio.

Vääntömomentin ohjaus perustuu vääntömomentin ja jättämän väliseen pysyvän tilan yhtälöistä johdettavaan riippuvuuteen

$$T = \frac{3}{2} p \frac{\omega_r \psi^2 r}{R_r} \quad (12)$$

jossa, T = vääntömomentti
 p = napapariluku
 ω_r = jättämäkulmataajuus
 ψ_r = roottorikäänivuo
 R_r = roottoriresistanssi

Säätö pystyy arvioimaan moottorin vääntömomenttia pätövirran avulla, mutta varsinaista moottorimallia se ei sisällä. Muutostilanteissa uuteen vääntömomenttiarvoon asettuminen voi kestää satoja millisekunteja, joten skalaarisäätökään ei sovellu dynamiikaltaan vaativiin sovelluksiin. [1; 8; 9.]

6.3 Vektorisäätö

Vääntömomentti saa ristikenttäperiaatteen mukaisesti maksiminsa, kun virta- ja käämi-
vuovektori ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan, eli niiden välinen kulma on 90° . Täysin

kompensoidussa tasavirtakoneessa tämä toteutuu aina, mutta oikosulkukoneessa näiden suureiden välinen kulma riippuu tilanteesta. Oikosulkukoneessa magnetoiva virta on syötettävä staattorin kautta, toisin kuin esimerkiksi tahti- taikka tasasähkökoneessa.

Vektorisäädön perusidea on jakaa koneen mitattu virta pitkittäiseen ja poikittaiseen komponenttiin. Pitkittäinen virtakomponentti i_d tuottaa koneen magnetoinnin ja siitä saadaan koneen käämivuon oloarvo. Poikittainen komponentti i_q tuottaa koneen vääntömomentin ja siitä saadaan koneen vääntömomentin oloarvo. Näin pyritään saamaan oikosulkukoneelle tasasähkökoneen säädettävyyttä, eli voidaan säätää koneen magnetointia ja vääntömomenttia erikseen.

Skalaarisuureena vääntömomentti voidaan laskea seuraavasti

$$T_e = \frac{3}{2} p |\Psi_s| |i_s| \sin \beta \quad (13)$$

jossa, T_e = sähköinen vääntömomentti
 p = napapariluku
 i_s = staattorivirtavektori
 Ψ_s = staattorikäämivuovektori
 β = näiden välinen kulma

Vektorisäätö jaetaan tyypillisesti suoraan ja epäsuoraan vektorisäätöön. Laskenta suoritetaan synkronisella kulmanopeudella pyörivässä koordinaatistossa, jolloin voidaan käyttää tasasuureita. Laskennan jälkeen on ohjausarvot muutettava takaisin stationäärisen koordinaatistoon. Jotta tämä olisi mahdollista, tarvitaan reaaliaikainen tietä käytettävän koordinaatiston määräävästä vuosta.

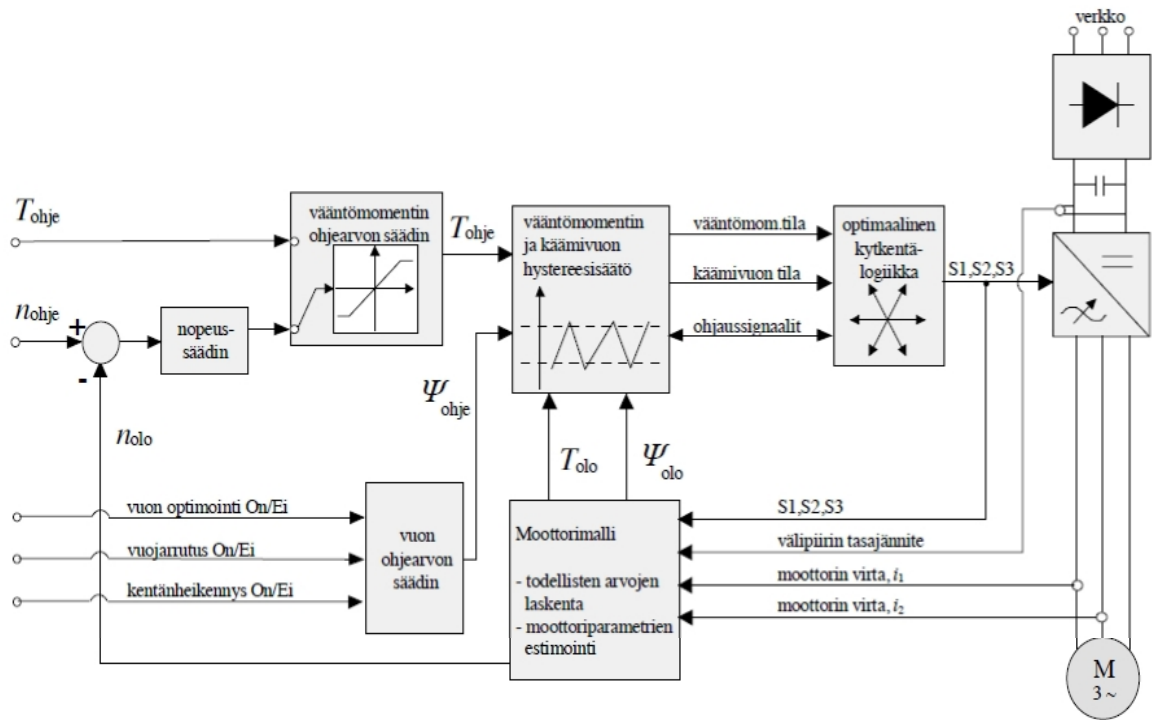
Suorassa vektorisäädössä vuo määritetään mittaamalla tai laskemalla se niin sanotun vuomallin avulla. Mittaus voidaan tehdä esimerkiksi Hall-anturilla, mutta silloin käyttöön tarvitaan erikoisvalmisteen moottori.

Epäsuorassa vektorisäädössä vuon asento määritellään roottorikulman ja virran ohjearvoista lasketun jättämäkulman summana. Vektorisäätö tarvitsee aina takaisinkytkennän.

Kuvassa 20 on esitetty vektorisäädön lohkokaavio. Siitä voidaan nähdä, että säätöpiiri itsessään on aika monimutkainen. Vektorisäätö pitää moottorin sähkömagneettisen tilan huomattavasti paremmin hallinnassa kuin skalaarisäätö. Vääntömomentin vasteaika on

Säädön perusosat ovat suora käämivuon ja vääntömomentin hystereesissäätö, adaptiivinen moottorimalli ja optimaalinen kytkentälogiikka.

Kuvasta 21 nähdään, että säätö mittaa moottorista kaksi vaihevirtaa, sekä välipiirin tasajännitteen. Adaptiiviseen moottorimalliin viedään virta- ja jännitetiedot, sekä kytkinten asentotiedot.



Kuva 21. Suoran vääntömomentinsäädön lohkokkaavio.

Pitkälle kehitetystä moottorimallista saadaan vääntömomentin, käämivuon ja pyörimisnopeuden oloarvot. Kytkentälogiikka valitsee vääntömomentin ja käämivuon oloarvon perusteella hetkellisen optimaalisimman kytkinasennon. Kaikki kytkimien ohjauspäätökset perustuvat koneen kulloisenkin sähkömagneettisen tilan tuntemiseen. Optimaalisessa kytkentälogiikassa kytkimien ohjaukset määrittää 40 MHz:n taajuudella toimiva digitaalisignaali prosessori ja ASIC-piiri. Kytkimiä voidaan ohjata joka 25. mikrosekunti momentin saavuttamiseksi tai ylläpitämiseksi. Ennalta määriteltä kytkenjärjestystä ei ole, vaan kytkennät päätetään erikseen joka kierroksella. [11.]

6.4.2 Suora käämivuon säätö

Avaruusvektoriteorian mukaisesta sijaiskytkennästä on oikosulkumoottorin vääntömomentille johdettavissa yhtälö

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s L_r} |\Psi_r| |\Psi_s| \sin \gamma \quad (14)$$

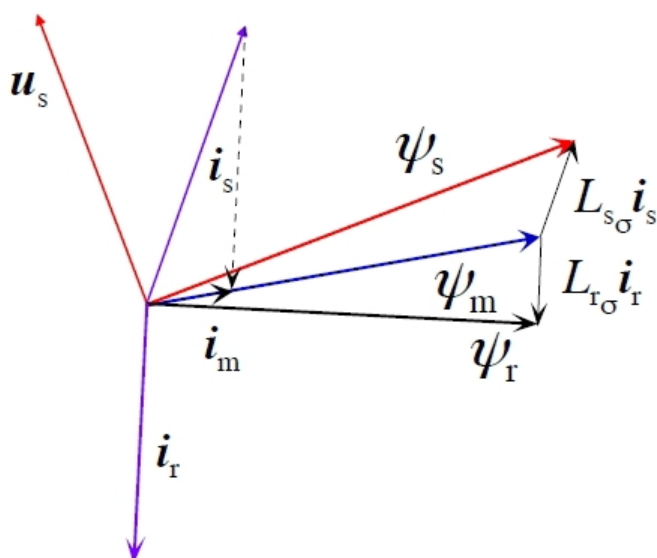
jossa,

- T_e = sähköinen vääntömomentti
- p = napapariluku
- L_m = magnetointiinduktanssi
- L'_s = staattorin roottoriin redusoitu induktanssi
- L_r = roottorin induktanssi
- Ψ_r = roottorikäämivuovektori
- Ψ_s = staattorikäämivuovektori
- $\sin \gamma$ = staattori- ja roottorivuon välinen kulma

Tästä yhtälöstä voidaan päätellä, että jos staattori- ja roottorikäämivuot pidetään itseisarvoiltaan vakioina, voidaan vääntömomenttiin vaikuttaa näiden välistä kulmaa muuttamalla.

Taulukosta yksi nähdään, että oikosulkumoottorin roottorin aikavakio on varsin pitkä, ja sitä pidempi, mitä suurempitehoinen kone on kyseessä. Näin ollen roottorivuo voidaan olettaa vakioksi muutostilanteissa, ja säädössä keskittyä ohjaamaan staattorikäämivuota. Koska molemmat käämivuot sisältävät myös hajakomponentit voidaan väittää, että vain koneen hajaannus rajoittaa muutosnopeutta. Suora käämivuonsäätö on siten nopein tapa muuttaa oikosulkukoneen vääntömomenttia. [4; 9.]

Kuva 22 havainnollistaa tilannetta. Kun staattorikäämin jännitevektorin kulmaa muutetaan, muuttuu myös staattorikäämivuon kulma sen mukana. Roottorin aikavakiosta johtuen roottorikäämivuon kulma pysyy paikallaan ja näin käämivoiden välistä kulmaa voidaan muuttaa halutusti.

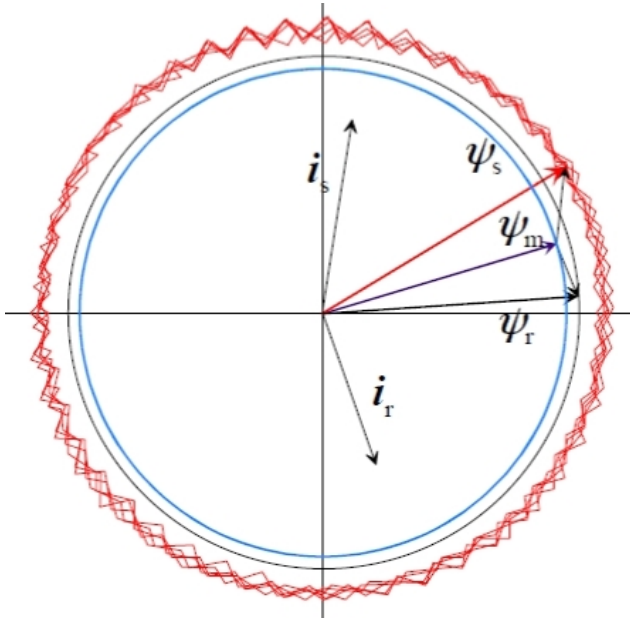


Kuva 22. Oikosulkukoneen vektoripiirros.

Seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 23 esitetään käännevien käyttäytymistä koneessa. Jännitevektoreiden kytkentöjen vuoksi staattorikäännevuoto on hyvin väreinen. Koneen aikavakiot kuitenkin suodattavat väreet pois ilmavälivuosta ja varsinkin roottorivuosta.

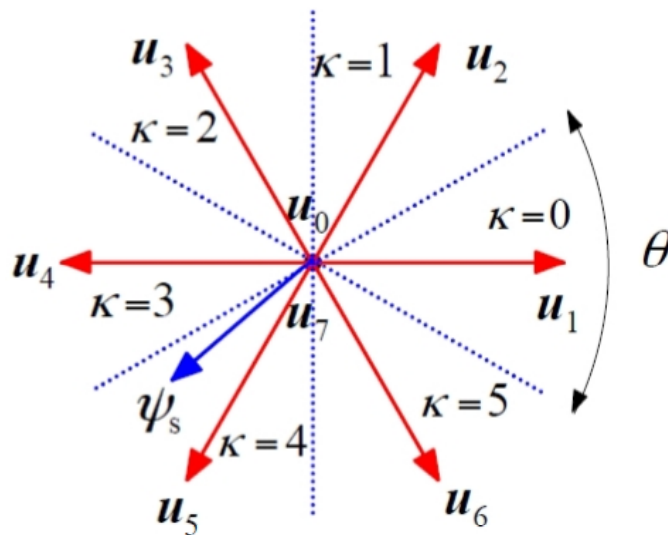
Vaikka roottorikäännevuon kulmanopeus on hyvin tasainen stationaarisessa tilassa ja staattorikäännevuon erittäin epätasainen, on niiden keskimääräinen kulmanopeus kuitenkin sama. Vakiovuoalueella staattorikäännevuota pidetään vakiona, ja kentänheikennyksessä sitä aletaan pienentämään kääntäen verrannollisena taajuuteen. [4; 9.]

Kentänheikennyksessä voidaan ottaa käyttöön vuon kuusikulmainen ohjaus, sitä käyttämällä voidaan saavuttaa suurin lähtöjännite. Hetkellinen kuormitettavuus on suurempi kuin ympyräkuviolla, mutta jatkuva kuormitettavuus on pienempi kentänheikennyspisteestä 1,6 kertaa kentänheikennyspisteeseen lisääntyneestä häviöstä johtuen. [10.]



Kuva 23. Käämivoiden käyttäytyminen.

Suoran käämivuon toteutukseen tarvitsee tietää käämivuovektorin paikka vuoympyrällä. Vuoympyrä jaetaan kuuteen sektoriin kuten kuvassa 24 siten, että sektorien rajat puolittavat kaksitasoinvertterin jännitevektorien väliset kulmat.



Kuva 24. Vuoympyrän jako jännitevektoreiden mukaisiin sektoreihin.

Staattorijännite lasketaan kytkinasentotietojen S_A , S_B , S_C ja välipiirijännitteen U_{DC} avulla. Staattorijännitevektori voidaan laskea suoraan komponenttimuodossa staattorikoordinaatistossa seuraavalla tavalla

$$u_{sa} = \frac{2}{3} U_{DC} \left(S_A - \frac{1}{2} (S_B - S_C) \right) \quad (15)$$

$$u_{s\beta} = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{DC} (S_B - S_C) \quad (16)$$

jossa, u_{sa} = jännitevektorin suuruus
 $u_{s\beta}$ = jännitevektorin suunta

Staattorin käämivuovektorin määrittäminen perustuu staattorikäämiin kytketyn jännitevektorin integrointiin staattorikoordinaatistossa, jossa otetaan huomioon staattorin jännitehäviöt seuraavasti

$$\Psi_{s,est} = \int (u_s - R_s i_s) dt \quad (17)$$

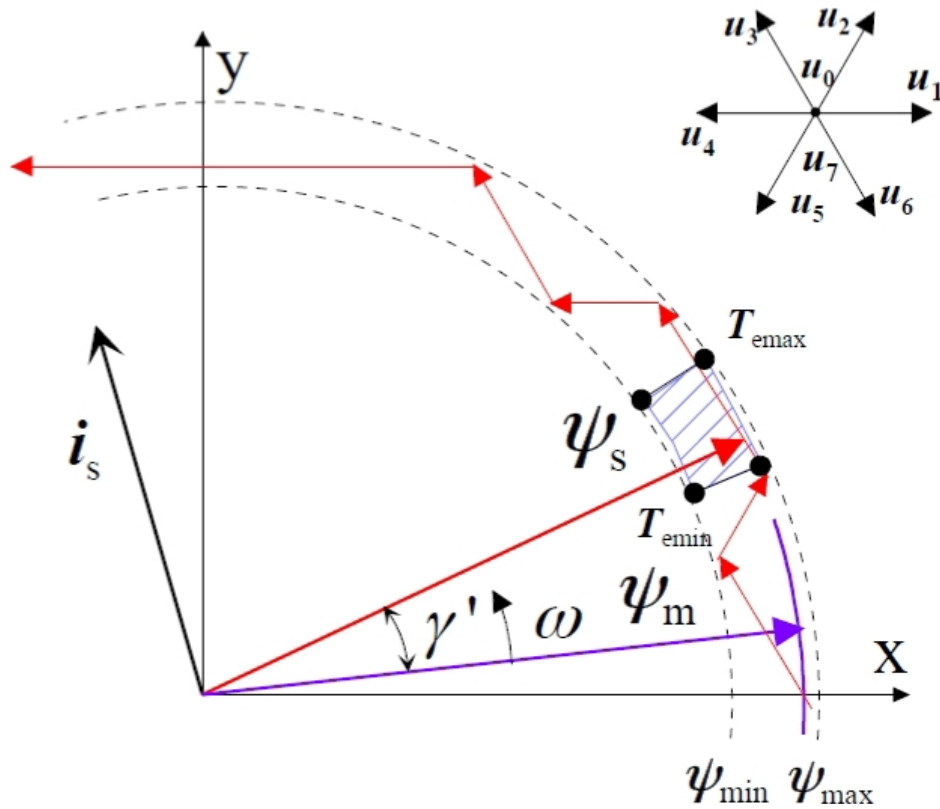
jossa, $\Psi_{s,est}$ = estimoitu staattorin käämivuo
 u_s = staattorin jännitevektori
 i_s = staattorin virtavektori
 R_s = staattorin resistanssi

Adaptiivisessa moottorimallissa pyritään lisäksi ottamaan huomioon invertterin epälineaarisuudet, kuten kuollut aika ja tehokytkimien jännitehäviöt, ja lasketaan käämivuoestimaattien lisäksi pyörimisnopeus nopeuden takaisinkytkentää varten. [9.]

Kytkinohjeet muodostetaan käämivuon ja vääntömomentin hystereesirajojen sisällä staattorivuoestimaatin sijainnin perusteella. Kytkimien asentoa muutetaan ainoastaan silloin, kun käämivuon taikka vääntömomentin itseisarvot poikkeavat liiaksi asetusarvoistaan. Kun hystereesiraja saavutetaan, valitaan seuraava jännitevektori ohjaamaan staattorikäämivuota oikeaan suuntaan. Käämivuota säädettäessä kussakin kuvan 24 sektorissa voidaan käyttää kumpaankin pyörimissuuntaan kahta eri jännitevektoria, toinen suurentaa ja toinen pienentää vuota. Kaksipistesäädössä arvoa suurennetaan, kunnes se tulee ylärajalle, sen jälkeen sitä pienennetään, kunnes se saavuttaa alarajan.

Hystereesirajoihin vaikuttaa myös kytkentätaajuus, jos kytkentätaajuuden yläraja uhkaa ylittyä, joudutaan hystereesirajoja suurentamaan. Staattorikäämivuoehon nähden poikittaisilla jännitevektoreilla on erittäin voimakas vaikutus vääntömomenttiin. [1; 4; 9.]

Kuvassa 25 olisi jännitevektoreilla u_3 ja u_6 erittäin voimakas vaikutus vääntömomentin muutokseen. Oikeassa yläreunassa sijaitsevalla kaksitasoinvertterin jännitevektoridiagrammilla näytetään sitä mihin suuntiin käämivuon kärkeä voidaan vuoympyrällä ohjata.



Kuva 25. Staattorikäämivuon ja vääntömomentin hystereesirajat.

Kun staattorikäämivuota ja vääntömomenttia ohjataan yhdessä ja niiden hystereesirajat yhdistetään, sekä otetaan huomioon käämivuovektorin paikkatieto vuoympyrällä, saadaan niin kutsuttu Takahashin optimikäntötaulukko joka on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2 kertoo, mikä jännitevektori pitää seuraavaksi valita mahdollisimman tasaisen käämivuoympyrän ja vääntömomentin aikaansaamiseksi ilman ylimääräisiä kytkentöjä. [4; 9.]

Koska käämivuo halutaan pitää rajojen sisällä, sitä joko suurennetaan tai pienennetään. Vääntömomentille on kolme vaihtoehtoa, sitä joko suurennetaan, pienennetään tai käytetään nollajännitettä. Taulukossa 2 $d|\psi_s|$ kuvaa käämivuota ja dT_e vääntömomenttia.

Taulukko 2. Takahashin optimikäyntötaulukko.

| Käämivuon sijainti | | k = 0 | k = 1 | k = 2 | k = 3 | k = 4 | k = 5 |
|--------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $d \Psi_s $ | dT_e | | | | | | |
| 1 | 1 | u_2 | u_3 | u_4 | u_5 | u_6 | u_1 |
| | 0 | u_0 | u_7 | u_0 | u_7 | u_0 | u_7 |
| | -1 | u_6 | u_1 | u_2 | u_3 | u_4 | u_5 |
| 0 | 1 | u_3 | u_4 | u_5 | u_6 | u_1 | u_2 |
| | 0 | u_7 | u_0 | u_7 | u_0 | u_7 | u_0 |
| | -1 | u_5 | u_6 | u_1 | u_2 | u_3 | u_4 |

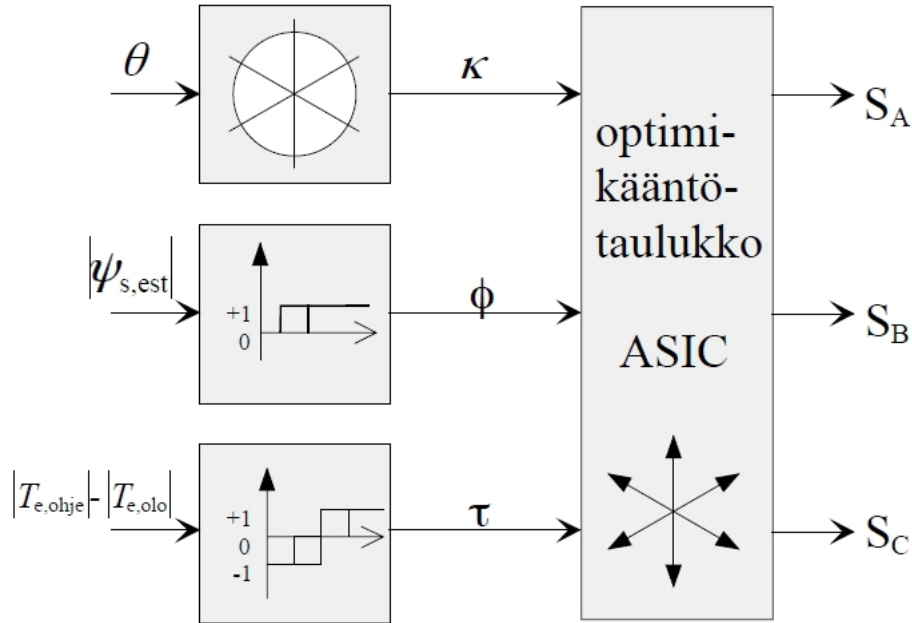
Takahashin taulukkoa voidaan suoraan soveltaa kaksitasoinvertterin kytkinten ohjaukseen, kuten alla olevassa taulukossa 3.

Taulukko 3. Kolmivaiheisen kaksitasoinvertterin muodostamat jännitevektorit.

| Kytkin | Asentokombinaatiot | | | | | | | |
|----------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S_A | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| S_B | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_C | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Jännitevektori | u_0 | u_5 | u_6 | u_1 | u_2 | u_3 | u_4 | u_7 |

Koska säätösyklin pituus on 25 mikrosekuntia, on se myös lyhin mahdollinen kesto jännitepulssille. Valinta on kompromissi laskentatehon ja säädettävyyden kannalta [9]. Käytännössä kuitenkin kytkentätaajuus on paljon alhaisempi.

Kun käämivuon paikkatieto vuoympyrällä, käämivuon suuruus ja vääntömomenttiohje yhdistetään ASIC-piirissä taulukkojen 2 ja 3 mukaisesti, saadaan kuvan 26 mukainen lohkokkaavio kytkimien ohjaukselle.

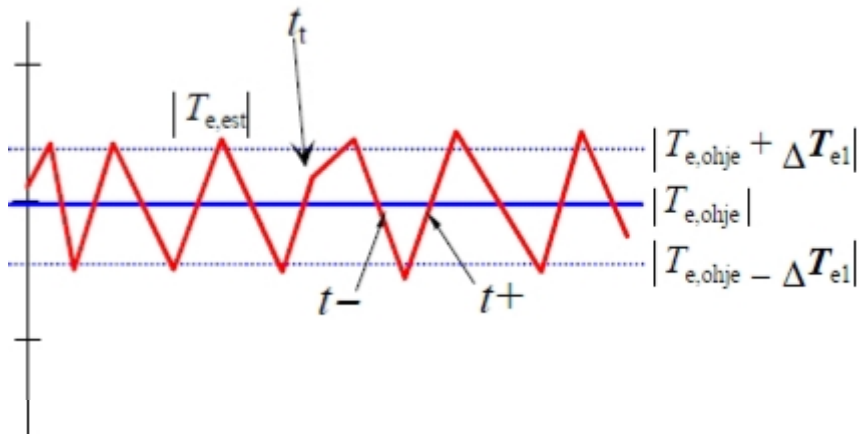


Kuva 26. Kytkimien ohjauksen lohkokkaavio käämivuon ja vääntömomentin säädölle.

6.4.3 Vääntömomentin säätö

Vääntömomentin hystereesisäätö on kolmipistesäätö. Vääntömomenttia pienennetään, suurennetaan tai sen annetaan säilyä ennallaan. Tyypillisesti vääntömomentin säädössä käytetään kaksia hystereesirajoja. Sisemmillä hystereesirajoilla vääntömomenttia joko kasvatetaan viemällä käämivuota moottorin pyörimissuuntaan vievä jännitevektori tai valitsemalla nollavektori, jolloin käämivuovektori pysyy paikallaan ja sen itseisarvo pienenee hitaasti. Uloimmilla hystereesirajoilla voidaan momentin pienentämiseen taikka suurentamiseen käyttää jännitevektoria, joka pienentää tai suurentaa suoraan vääntömomenttia. [9.]

Seuraavan sivun kuvassa 27 on esitetty sähköisen vääntömomentin värähtely ohjearvon molemmiin puolin. Värähtely tapahtuu useiden kilohertsien taajuudella ja mekaaninen järjestelmä suodattaa sen pois, joten siitä ei yleensä aiheudu haittaa. Pienillä taajuuksilla toimittaessa kytkentätaajuuden hidastuminen kuitenkin hidastaa värähtelyn taajuutta ja suurentaa amplitudia, joten se aiheuttaa ylimääraistä epätarkkuutta vääntömomenttiin. Tämä saattaa herättää ajettavan systeemin mekaanisia ominaistajuuksia ja aiheuttaa ongelmia säätöön.



Kuva 27. Vääntömomentin hystereesisäätö.

Kuvion epäsäännöllisyys hetkellä t_t kuvastaa sitä, kun käämivuosaatäjä valitsee uuden jännitevektorin ja pienentää käämivuota. Samalla hetkellä vääntömomentin kasvun muutosnopeus muuttuu. Vääntömomentin säädön hystereesiä T_{e1} säädetään PI-säätimellä, joka samalla määrittelee keskimääräisen kytkentätaajuuden. [4; 12.]

6.4.4 Kytkentätaajuus

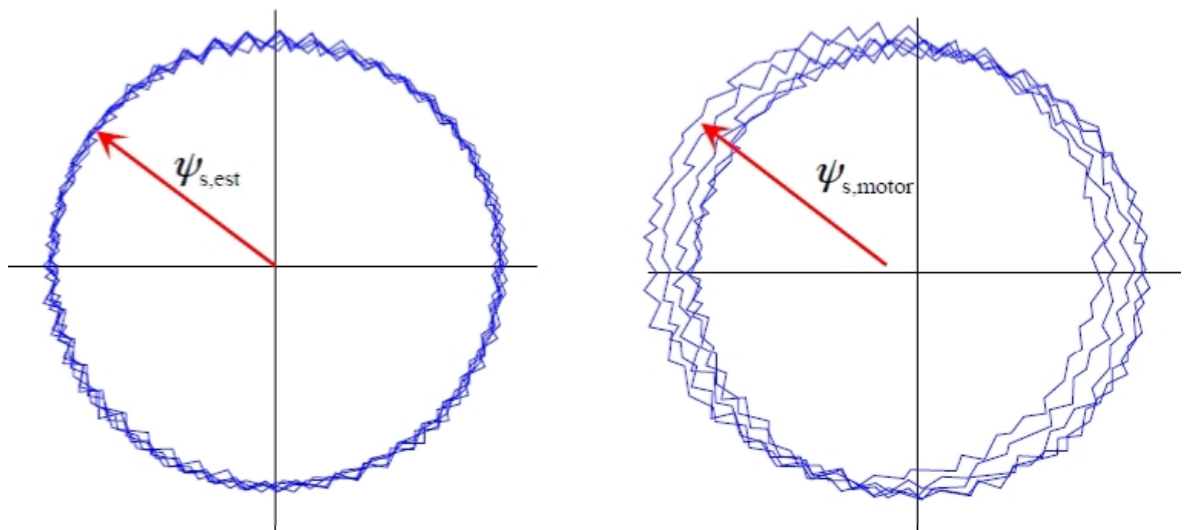
DTC pyrkii pitämään kytkentätaajuuden vakiona. Momentin ja vuon hystereesejä säädetään PI-säätäjällä siten, että kytkentätaajuus pysyisi asetusarvossaan. Kuitenkin pienillä taajuuksilla ja pienillä jännitteillä käy niin, että kytkentätaajuus putoaa alemmaksi. Tämä johtuu siitä, että minimi-kytkentäpulsseja on kohtuullisen pitkä ja jo yksi pulssi tekee liian pitkään kestävä jännitevektorin, eli vuo muuttuu haluttua nopeammin.

Hitailla nopeuksilla on oltava kytkemättä pitkän aikaa, eli käytettävä nollavektoreita, jotta keskimääräinen jännite pysyisi pienenä ja jottei vuo värähtelisi liikaa.

Suurella nopeudella, kun moottorin pääjännitteiden huiput lähestyvät välipiirijännitteen tasoa, tapahtuu vastaava ilmiö. Yksikin nollapulsseja voi pudottaa jännitettä turhan paljon ja vuo jää liikaa jälkeen halutusta, siksi nollajännitevektoreiden määrä alkaa vähentyä ja kytkentätaajuus laskee. [12.]

6.4.5 Virtamallikorjaus

Suoran käämivuonsäädön jänniteintegrointimalli ei yksinään riitä koneen tarkkaan säätöön. Varsinkin pienillä taajuuksilla pelkkää jännitemallia käyttämällä alkaa käämivuohon kertyä virhettä. Kun jännite on pieni, alkavat häviöt ja resistanssit kuluttaa jopa 50 – 70 % staattorin jännitteestä. Jännitteen alenemaa on nykyisellä laskentakapasiteetilla mahdollonta arvioida tarkasti, eikä jännitteen mittaaminenkaan tule kaupallisessa tuotteessa kysymykseen, se olisi aivan liian kallista. Koska käämivuon ohjaus perustuu staattorijännitevektorin integrointiin, alkaa siihen tulemaan poikkeuksetta virhettä silloin kuin jännitteen estimointi ei ole tarkkaa. Pienetkin virheet voivat aiheuttaa suuren virhekertymän. Staattorikäämivuon eteneminen vuoympyrässä ei ole enää origokeskeistä, vaan käämivuon kärjen piirtämä ura ajautuu ulos origokeskeiseltä radalta kuvan 28 mukaisesti.



Kuva 28. Staattorikäämivuon ajautuminen ulos origokeskeiseltä radalta.

Käämivuon ajautuminen ulos origokeskeiseltä uralta jännitemallia käyttämällä kestää tyypillisesti kymmeniä millisekunteja. Myös virtamalli laskee käämivuoestimaattia ja näitä kahta estimaattia verrataan sopivin väliajoin toisiinsa ja tehdään tarvittava korjaus staattorikäämivuohon.

Säädön luonne on sellainen, että jännitemallia painotetaan muutostilanteissa erittäin nopean vasteensa vuoksi ja virtamallia käytetään enemmänkin stationaarisessa tilassa korjaamaan jännitemallin aiheuttamaa käämivuon ajautumista.

Virtamallikorjaus perustuu roottorikäämivuon ja roottorivirtavektorin kohtisuoruusehtoon sekä adaptiivisen moottorimallin muodostamaan virran ja vääntömomentin suhteeseen. [4; 9.]

7 Suoran vääntömomentin säädön virheet

Vaikka suorassa vääntömomentin säädössä olisi käytössä nopeusanturi ja moottorin lämpötila olisi tiedossa, on vääntömomentin säädön pitäminen tarkkana koko pyörimisnopeusalueella vaikeaa.

Virhe syntyy neljän tekijän yhteisvaikutuksesta:

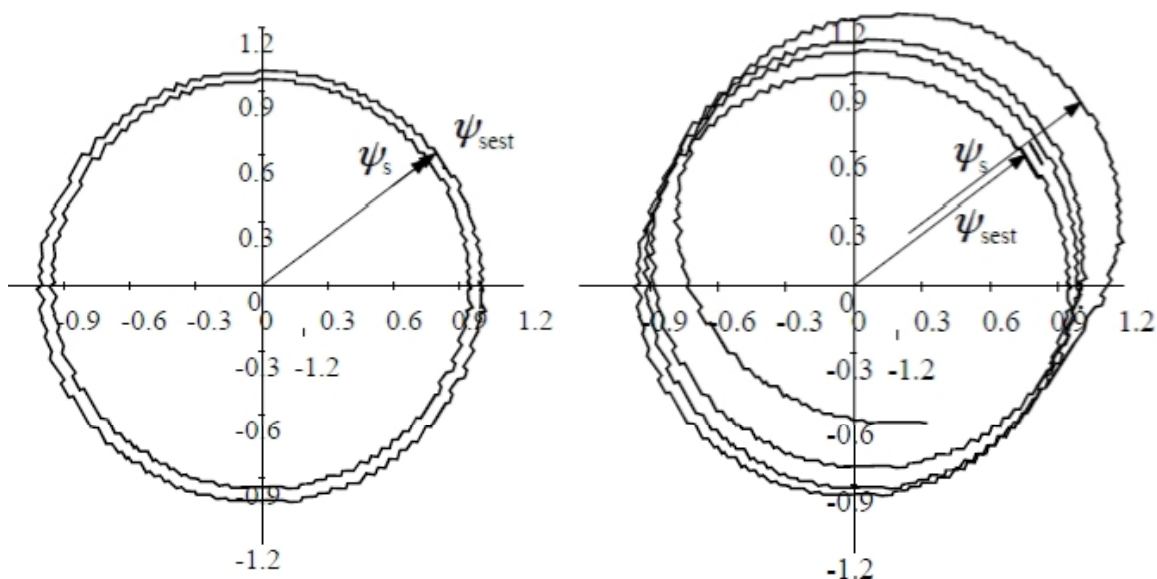
- Jännitevälipiirin jännitteen mittausrvirheestä
- Staattorin vaihevirtojen mittausrvirheestä
- Kytkimien jännitehäviön estimointivirheestä
- Staattoriresistanssin estimointivirheestä

Luonteeltaan nämä virheet voidaan jaotella kahteen ryhmään:

- Vahvistusrvirheeseen
- Offset-virheeseen

Vahvistusrvirheet aiheuttavat pysyvää virhettä staattorikäämivuon integrointiin. Offset-virhe aiheuttaa vaihesuureisiin tasakomponentteja ja saa staattorikäämivuovektorin ajautumaan epäkeskeisesti pois origosta. Vääntömomentissa se näkyy pyörimisnopeuden verrattavissa olevana sykkivänä virheenä. Käämivuon ohjaukseen liittyy siis kahden tapaista virhettä. Joko virhe on stabiili ja pysyvä, taikka epästabiili ja jatkuvasti karkaava joka vie staattorikäämivuota pois origokeskeiseltä radalta. Jälkimmäinen näistä on huomattavasti pahempi ongelma. [4.]

Seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 29 esitetään käämivuon ajautumisen virheet. Vasemmalla on vahvistusrvirheestä johtuva stabiili käyttäytyminen ja oikealla epästabiili sykkivä virhe.



Kuva 29. Käämivuon vahvistus- ja offset-virhe.

Staattori-resistanssin estimointivirhe on virheistä kaikkein merkittävin ja se on suoraan verrannollinen vääntömomenttinvirheeseen. On osoitettu sekä analyyttisesti, että kokeellisesti, että jos resistanssi estimoidaan liian suureksi, kasvaa käämivuon virhetermi käämivuon suuntaan ja säädöstä tulee epästabiili. Mikäli resistanssi estimoidaan liian pieneksi, pienenee käämivuon virhe ja säätö on stabiili. Nopeusanturittomassa käytössä staattorin resistanssin muuttuminen ja nopeusanturillisessa käytössä enemmänkin roottori-resistanssin muuttuminen lämpötilan mukana tekee momentin tarkasta säädöstä koko pyörimisnopeusalueelle erittäin haastavaa.

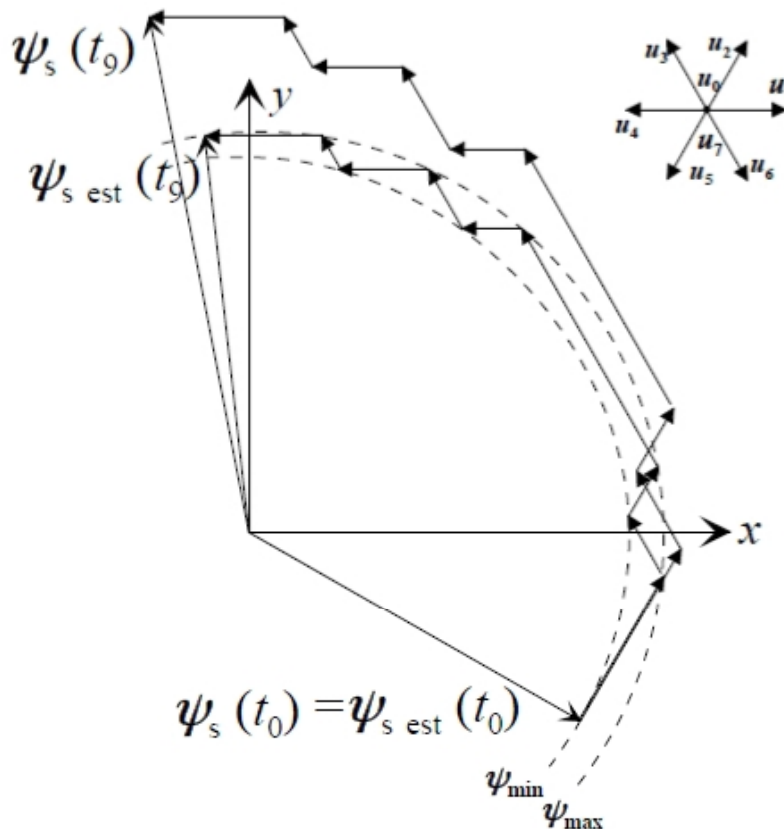
On osoitettu, että vääntömomenttinvirhe on suoraan verrannollinen myös jännitevälipiirin mittausrvirheeseen. Jos mitattu jännite on pienempi kuin oikea jännite, syntyy offset-virhe ja jos suurempi, niin syntyy stabiili pysyvä virhe käämivuohon.

Vääntömomenttinvirhe on suoraan verrannollinen virranmittauksen neliöön. Vahvistus ja offset-virheet virranmittauksessa aiheuttavat samankaltaisia virheitä kuin välipiirin jännitteen mittauksessakin. Virranmittauksen vahvistusvirhettä voidaan pitää jännitehäviölasennan virheenä ja lopulta jännitevirheenä, joka aiheuttaa pysyvän stabiilin käämivuon virheen. Jos virranmittauksessa on offset-virhettä, aiheuttaa se tasakomponentin, joka johtaa välittömästi käämivuon ajautumiseen.

Tehokytkimien jännitehäviöille on hankalaa käyttää mitään tarkkaa mallia nykyisen laskentakapasiteetin aikana. Lisäksi niiden häviöt vaihtelevat hankalasti valmistuserien mukaan. Kytinkomponenttien mallinnusvirhettä voidaan verrata staattoriresistanssin estimointivirheeseen.

On tärkeää ottaa huomioon, että vääntömomenttiestimaatin virhe on kääntäen verrannollinen taajuuteen. Suurilla nopeuksilla virhe on lähes olematon, mutta nollosopeudella estimointivirhe johtaa erittäin suureen vääntömomentin virheeseen. [1; 4; 9; 12.]

Kuvassa 30 on staattorin resistanssi estimoitu suuremmaksi kuin se todellisuudessa on. Staattorikäämijännite on suurempi kuin jännite-estimointi. Jännitevektoria pidetään valittuna kunnes estimoitu käämivuo saavuttaa hystereesirajansa. Todellisuudessa raja on jo ylitetty ja säädöstä on tullut epävakaa. Todellinen käämivuo ja vääntömomentti on paljon suurempi kuin estimoitu.



Kuva 30. Käämivuon ajautuminen ulos hystereesirajoista.

8 Viritystekniikoita

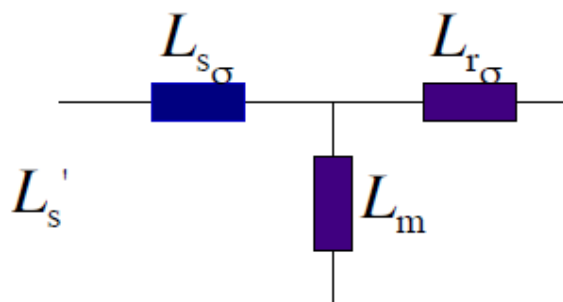
8.1 Identifiointiajo

Tärkein yksittäinen moottorin viritykseen liittyvä toimenpide on käyttöönotossa tehtävä identifiointiajo, ID-ajo, joka täydentää adaptiivista moottorimallia moottorin kilpiarvojen lisäksi. Käyttäjä antaa aluksi moottorin nimellisen virran, jännitteen, taajuuden, pyörimisnopeuden ja tehon.

ID-ajossa syntyvä moottorimalli on olennainen säädön tarkkuuden kannalta ja se tulee tehdä aina, kun se on mahdollista. ID-ajossa määriteltävistä parametreista tärkeimpiä ovat staattorin resistanssi, staattorin hajainduktanssi ja magnetointi-induktanssi.

Staattorin resistanssi identifioidaan käynnistyksen yhteydessä syöttämällä koneeseen tasajännitettä ja mittaamalla virta, joten tarvittavaa IR-kompensointia ei tarvitse alkaa manuaalisesti hakemaan.

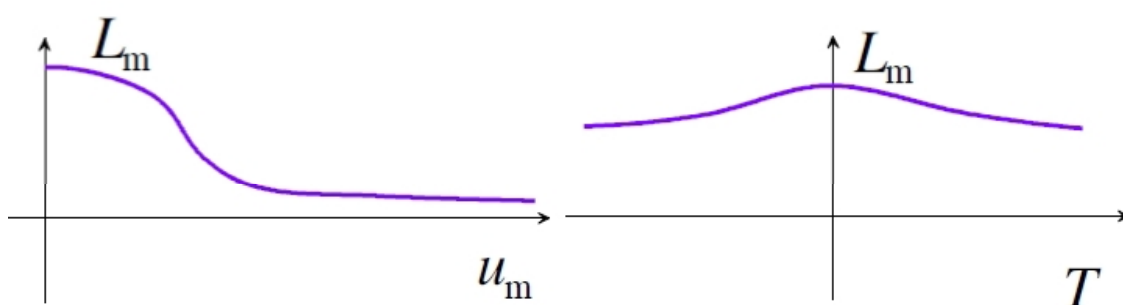
Seuraavaksi määritetään moottorin transientti-induktanssi (Kuva 31.). Se kuvaa nopean staattoriin syötettävän jännitepulssin kohtaamaa induktanssia. Koneen roottori ei ehdi reagoida pulssiin kuin hajainduktanssillaan, magnetointi-induktanssin läpi ei virtaa kerkeä juurikaan kulkemaan. Koneen sen hetkinen magnetointitila on otettava huomioon, mutta jos tiedonkeruuväli on sopiva, voidaan dynaaminen induktanssi määrittää yhdellä pulssilla. Jos saadaan mitattua esimerkiksi virran muutos välillä 25 – 80 %, ei koneen magnetointitulalla ole juurikaan merkitystä. Kokemusperäisesti voidaan sanoa, että staattorin hajainduktanssi on noin 70 % saadusta transientti-induktanssin arvosta. Näin hajainduktanssi on määritelty. [4.]



Kuva 31. Transientti-induktanssin sijaiskytkentä.

Koneen magnetointi-induktanssi onkin sitten helppo periaatteessa määrittää. Suosituksen mukainen ID-ajo tehdään kuormittamattomalla moottorilla ja kuormittamaton moottori ottaa verkosta vain magnetointivirtaa.

Asia ei kuitenkaan ole näin yksinkertainen. Tyhjäkäynnissä tehtävä mittausta ei anna oikeaa kuvaa koneen magnetointi-induktanssin käytöksestä kuormitettuna. Induktanssi kyllästyy jännitteen ja vääntömomentin funktiona [4]. Vuo venyy ilmavälissä kuvan 12 mukaisesti, mikä näkyy käytännössä magnetointi-induktanssin kyllästyksenä. Kuvassa 32 esitetään magnetointi-induktanssin kyllästyminen ilmavälijännitteen ja vääntömomentin funktiona.



Kuva 32. Magnetointi-induktanssin kyllästyminen ilmavälijännitteen ja momentin funktiona.

8.2 Roottoripiirin muokkaus

Koska roottorilla on voimakas vaikutus koneen kehittämään momenttiin, on tehokasta virittää käyttöä manipuloimalla roottoriin liittyviä parametreja.

Esimerkiksi roottorin aikavakion, eli magnetointi-induktanssin ja roottoriresistanssin suhteen, muokkaamisella on voimakas vaikutus vääntömomenttiin. Asiaa vaikeuttaa se, että roottorin aikavakio ei ole vakio, vaan riippuu voimakkaasti lämpötilasta, jota ei voi roottorista mitata helposti.

Roottorin resistanssia on mahdollista muokata myös nimellisen taajuuden ja pyörimisnopeuden suhdetta muuttamalla. Eli muokkaamalla moottorin todellisia kilpiarvoja. [12.]

Esimerkiksi ABB:n ACS800 taajuusmuuttajan moottorinohjausparametreista magne-
tointi-induktanssia ja vaikka roottorin aikavakiota voidaan muuttaa suoraan erikseen.
Tämä helpottaa käytön viritystä.

8.3 Lämpötilakompensointi

Koska koneparametrit muuttuvat lämpötilan mukana ja adaptiivinen moottorimalli ottaa
sen huomioon, on paras tulos saavutettavissa, jos moottorissa on lämpötilan mittaus ja
se kytketään moottorimalliin.

Roottoriin manipulointi ja vääntömomentin tarkkuuden säätö tehdään viileällä ko-
neella ja sen jälkeen viritetään kuumalla koneella ainoastaan lämpöparametreja ja kom-
pensoinnin voimakkuutta, eikä muuteta enää roottoriin vaikuttavia parametreja. [12.]

9 Yhteenveto

Tämän insinöörityön tarkoituksena oli selvittää oikosulkumoottorikäytön ominaisuuksia
ja suoran vääntömomentin säädön toteutusta. Työn tekeminen opetti paljon vääntömo-
mentin syntymisestä oikosulkumoottorissa, oikosulkumoottorin säädöstä yleensäkin,
sekä suoran vääntömomentin säädön toteutuksesta ja heikkouksista.

Aina kun vääntömomenttia taikka käämivuota ei mitata, puhutaan kuitenkin ohjauksesta.
Ohjauksen tarkkuus perustuu laitteesta muodostettavan mallin tarkkuuteen, joten kun
kaupallisten tuotteiden laskentakapasiteetti kasvaa ja moottoreista saadaan tehtyä yhä
parempia malleja, on tulevaisuudessa tarjolla tarkempaa vääntömomenttia tuottavia taa-
juusmuuttajamalleja.

Lähteet

- 1 Niiranen, Jouko. 1999. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki: Haka-paino Oy.
- 2 Hietalahti, Lauri. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Vantaa: Hansaprint Oy.
- 3 ABB. 2000. TTT-käsikirja. Luku 18, Sähkömoottorikäytöt. Helsinki.
- 4 Pyrhönen, Juha. 2005. Sähkökäytöt -kurssin luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Sähkötekniikan osasto.
- 5 Korpinen, Leena. 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. Sähköenergiatekniikka –kurs-sin luentomateriaali. Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- 6 Lorentzin voima, verkkodokumentti. http://fi.wikipedia.org/wiki/Lorentzin_voima Luettu 2.3.2015.
- 7 Sipilä, Tuomo. 2009. Diplomityö. Oikosulkumoottorikäytön kokonaishäviöiden pie-nentäminen vaihtosuuntaajan kytkentätaajuuden valinnalla. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
- 8 Ahtiainen, Timo. 2009. Diplomityö. Servokäytön nopeussäädön automaattinen vi-ritys. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
- 9 Hietalahti, Lauri. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. Vantaa: Hansaprint Oy.
- 10 ABB. 2011. ACS800 taajuusmuuttajan ohjelmointiopas. Firmware Manual. ACS800 Standard Control Program 7.x. Revision L.
- 11 ABB. 2001. Tekninen opas nro 1. Suora momentinsäätö. Helsinki.
- 12 Hirvonen, Mikko. 2014. Principal Engineer, ABB Oy Drives. Sähköpostikeskustelu 9.5.2014 – 6.8.2014.